

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Konstrukční návrh posledního článku manipulátoru MR
Hercules a optimalizace jeho pohonné jednotky

Mechanical Design of the Last Segment of the Hercules
MR Manipulator and Optimization of its Driving Unit

Student:

Bc. Pavel Mihalík

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Krys

Ostrava 2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 17. května 2010

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдоміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдоміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 17. května 2010

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Pavel Mihalík

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ženklava 265, PSČ 742 67

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MIHALÍK, P. *Konstrukční návrh posledního článku manipulátoru MR Hercules a optimalizace jeho pohonné jednotky : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2010, 93 s. Vedoucí práce: KRYŠ, V.

Diplomová práce je zaměřena na návrh posledního článku manipulátoru mobilního robotu Hercules. Na začátku práce je vypracována rešerše na téma orientační ústrojí efektoru. Pro řešení posledního článku manipulátoru s rozšířením o jeden stupeň volnosti je zhotoven 3D model tří variant v softwaru Pro/ENGINEER pro podporu konstruování. Dále je vybrána optimální varianta, která je konstrukčně propracována a doložena potřebnými výpočty a výkresy. V závěru práce je stanovené doporučené omezení pro mobilní robot Hercules s navrženým posledním článkem manipulátoru.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MIHALÍK, P. *Mechanical Design of the Last Segment of the Hercules MR Manipulator and Optimization of its Driving Unit*. Ostrava: Department of Robotics, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 93 p. Thesis, head: KRYŠ, V.

The thesis is focused on the last segment of mobile robot manipulator Hercules. At the beginning of this work is developed research on the topic of guidance system effectors. To address the last article of the manipulator with adding one degree of freedom, is constructed 3D model of the three options in the software Pro / ENGINEER to support design. Next best option is chosen, which is structurally elaborated and supported by the necessary calculations and drawings. The conclusion is the recommended limit set for a mobile robot with the proposed Hercules last link manipulator

Chtěl bych vyjádřit poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. Václavu Krysovi za jeho postřehy, konzultace a cenné rady, které mi dával v průběhu psaní. Dále rodičům a Mgr. Zuzaně Piterákové za podporu během studia.

OBSAH

SEZNAM PŘÍLOH	10
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	11
ÚVOD	14
1 POŽADAVKOVÝ LIST.....	16
1.1 Název.....	16
1.2 Parametry MR Hercules.....	16
1.3 Poslední článek MR Hercules	16
1.4 Orientační ústrojí	17
1.5 Fotodokumentace mobilního robotu.....	18
2 ORIENTAČNÍ ÚSTROJÍ	19
2.1 Popis a skladba orientačního ústrojí.....	20
2.2 Typy provedení orientačního ústrojí.....	21
2.3 Konstrukční řešení orientačního ústrojí.....	23
2.4 Používané orientační ústrojí v praxi.....	24
2.4.1 Mobilní roboty	24
2.4.2 Průmyslové roboty	28
3 ANALÝZA POSLEDNÍHO ČLÁNKU MANIPULÁTORU A	
STÁVAJÍCÍ POHONNÉ JEDNOTKY	30
3.1 Hlavní délkové rozměry	30
3.2 Rozměry převodovky	30
3.3 Parametry pohonné jednotky.....	31
4 NAVRŽENÉ VARIANTY ŘEŠENÍ RAMENE.....	34
4.1 Řemenový převod	34
4.1.1 Detailní popis varianty	34
4.1.2 Parametry ramene	37
4.2 Převod kuželovými ozubenými koly	37
4.2.1 Detailní popis varianty	38
4.2.2 Parametry ramene	40
4.3 Pohon umístěný v kloubu OÚ	40
4.3.1 Detailní popis varianty	41
4.3.2 Parametry ramene	42
5 VOLBA OPTIMÁLNÍHO ŘEŠENÍ RAMENE ROBOTU	43
5.1 Hodnotová analýza	43
5.1.1 Metoda porovnávání v trojúhelníku páru	44
5.1.2 Výsledky hodnotové analýzy	45
5.1.3 Závěr hodnotové analýzy	46

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VYBRANÉ VARIANTY	48
6.1 Detailní popis vybrané varianty	48
6.2 Orientační ústrojí efektoru	50
6.2.1 Parametry orientačního ústrojí efektoru	52
6.2.2 Silový rozbor orientačního ústrojí efektoru	53
6.3 Návrh pohonu orientačního ústrojí efektoru	54
6.3.1 Typ pohonu Harmonic Drive LLC	56
6.4 Ozubený řemen a řemenice	57
6.5 Profil nosného ramene	59
6.5.1 Silový rozbor nosného ramene	60
6.5.2 Pevnostní analýza nosného ramene	61
6.6 Krytování řemene.....	62
7 KONTROLA HLAVNÍCH KONSTRUKČNÍCH UZLŮ	64
7.1.1 Interface	64
7.1.2 Kontrola pevnosti pohyblivé části OÚ	66
7.1.3 Hřídel OÚ efektoru	66
7.1.4 Kluzná ložiska.....	67
kluzné ložisko: RFM-1012-10	68
7.1.5 Distanční příruba pohonu	69
7.2 Návrh napínacího šroubu	69
8 KONTROLA STÁVAJÍCÍ POHONNÉ JEDNOTKY.....	72
8.1 Výpočet zrychlení ramene 3	72
8.2 Kontrola třetí pohonné jednotky ramene 3.....	74
8.2.1 Výpočet ramene 3 bez objektu manipulace	76
8.3 Kontrola druhé pohonné jednotky ramene 2.....	77
8.4 Kontrola první pohonné jednotky	78
8.5 Kontrola ložiska první pohonné jednotky.....	80
8.5.1 Životnost ložiska	82
9 MONTÁŽ NAVRŽENÉHO RAMENE MR HERCULES	85
9.1 Postup montáže	85
ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ.....	89
LITERATURA	90
INTERNETOVÉ ZDROJE	91
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	92

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Technická data harmonické převodovky CSG-20-2UH-160
- Příloha 2: Technická data motoru Maxon EC-90-FLAT
- Příloha 3: Technická data pohonu Harmonic drive FHA-11C-100
- Příloha 4: Parametry řemenic Tyma AT10
- Příloha 5: Sestavný výkres RAMENO 3 (SN2-ROB01-01)
- Příloha 6: Podsestavný výkres ORIENTAČNÍ ÚSTROJÍ (SN2-ROB01-02)
- Příloha 7: Výrobní výkres DISTANČNÍ PŘÍRUBA (SN2-ROB01-03)
- Příloha 8: Výrobní výkres DESKA POHONU (SN2-ROB01-04)
- Příloha 9: CD-ROM MIHALÍK, P. : *Diplomová práce 2010*

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ZKRATKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
A	mm^2	plocha průřezu hřídele
a_j		a jiné
a_{OU}	ms^{-2}	zrychlení orientačního ústrojí efektoru
a_{IOM}	ms^{-2}	zrychlení středu objektu manipulace
a_{T3}	ms^{-2}	zrychlení těžiště ramene 3
$atd.$		a tak dále
b	mm	šířka ozubeného řemene
b_1	mm	šířka ložiska
b_2	mm	tloušťka příruby
b_{OU}	mm	tloušťka stěny pohyblivé části OÚ efektoru
d_{01}	mm	roztečný průměr řemenice hnací
d_{02}	mm	roztečný průměr řemenice hnané
d_1	mm	průměr dřívku
d_2	mm	vnější průměr ložiska
d_2	mm	střední průměr závitu šroubu
d_3	mm	průměr příruby
d_3	mm	malý průměr závitu šroubu
F	N	síla působící od objektu manipulace
$f = 0,5$	mm	velikost zkosení hrany
F_a	N	axiální síla
F_{am}	N	maximální axiální síla
F_{krit}	N	kritická síla
F_{od}	N	odstředivá síla
F_r	N	radiální síla
F_t		tíhová síla vyvolaná hmotností OM a OÚ efektoru
F_U	N	napínací síla ozubeného řemene
f_z	mm	tření na závitu
g	ms^{-2}	gravitační zrychlení
G_A	N	zátížení v bodě A
H	mm	hloubka
I'_{C3}	kgm^2	moment setrvačnosti ramene 3 bez objektu manipulace
I_{C1}	kgm^2	moment setrvačnosti manipulátoru vztažený k první pohonné jednotce
I_{C3}	kgm^2	celkový moment setrvačnosti ramene 3
I_{C3}	kgm^2	moment setrvačnosti obou ramen
I_L	kgm^2	moment setrvačnosti manipulátoru vztažený k axiální ose ložiska
i_R		redukovaný převodový poměr mezi řemenicemi
K1 - K6		kritérium
kd		koeficient bezpečnosti
k_s		koeficient bezpečnosti šroubu
k_X		dynamický radiální koeficient
k_Y		dynamický axiální koeficient
L		počet otáček ložiska
l'_{T3}	mm	vzdálenost těžiště od osy rotace bez objektu manipulace
l_{IOM}	mm	vzdálenost od první pohonné jednotky k středu OM

ZKRATKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
l_a	mm	osová vzdálenost (počáteční z Pro/Engineer)
$L_h =$	hod	doba životnosti
lij		Index změny
lij^*		vážený index kritérií
l_{IOM}	mm	vzdálenost osy rotace první pohonné jednotky ke středu OM
l_{nz}	mm	vzdálenost neseného zařízení od osy rotace ramene
l_{OM}	mm	vzdálenost objektu manipulace
los	mm	osová vzdálenost ozubených řemenic
l_{OU}	mm	vzdálenost osy rotace OÚ od osy rotace ramene
l_P	mm	vzdálenost pohonu od osy rotace ramene
Lsk	mm	skutečná délka řemene
Lt	mm	teoretická délka ozubeného řemene
l_{TOU}	mm	vzdálenost těžiště orientačního ústrojí
l_{Tr}	mm	vzdálenost těžiště ramene
l_y	mm	vzdálenost těžiště v ose y
l_z	mm	vzdálenost těžiště v ose z
M'_3	Nm	celkový moment ramene 3 bez objektu manipulace
m'_3	kg	hmotnost ramene 3 bez objektu manipulace
m_1	kg	hmotnost ramene 2, ramene 3 a druhé pohonné jednotky
m_1	kg	hmotnost manipulátoru
m_2	kg	celková hmotnost obou ramen
M_2	Nm	celkový moment působící na druhou pohonnou jednotku
m_3	kg	hmotnost ramene 3
M_3	Nm	celkový moment působící na třetí
M_B	Nm	momentové zatížení v bodě B
M_{Cl}	Nm	maximální klopný moment
M_{cr}	Nm	celkový moment ramene působící v bodě B
M_{D1}	Nm	dynamický moment působící na první pohonnou jednotku
M_{D2}	Nm	dynamický moment ramene 2
M_{D3}	Nm	dynamický moment ramene 3
M_{DA}	Nm	dynamický moment k bodu A
M_k	Nm	krátkodobý moment pohonu
M_{kM}	Nm	maximální krouticí moment motoru
M_{knom}	Nm	nominální moment pohonu
ML	Nm	klopný moment
M_{mnom}	Nm	nominální moment motoru
M_{N2}	Nm	moment nevyvážených hmot ramene 2
M_{N3}	Nm	moment nevyvážených hmot ramene 3
m_{nz}	kg	hmotnost neseného zařízení
m_{OM}	kg	hmotnost objektu manipulace
m_{OU}	kg	hmotnost orientačního ústrojí
M_{OU}	Nm	celkový moment působící od orientačního ústrojí na pohon
M_{OUP}	Nm	přepočet krouticího momentu působícího od OÚ efektoru na pohon
m_P	kg	hmotnost pohonu
m_r	kg	hmotnost ramene
M_R		mobilní robot
M_{SA}	Nm	statický moment k bodu A

ZKRATKA	JEDNOTKA	VÝZNAM
n_M	min^{-1}	otáčky pohonu
$\varnothing d_h$	mm	průměr hřídele
OM		objekt manipulace
OÚ		orientační ústrojí
P_C	N	dynamické ekvivalentní radiální zatížení
P_h	mm	stoupání závitu
q		váha významnosti kritéria
R1		rotace první pohonné jednotky
R2		rotace druhé pohonné jednotky
R3		rotace třetí pohonné jednotky
R_e	Mpa	pevnost třídy šroubu ISO 4762 – 6.8
r_{T1}	mm	vzdálenost těžiště ramene 2, ramene 3 a druhé pohonné jednotky
r_{T1}	mm	vzdálenost těžiště manipulátoru
r_{T2}		vzdálenost těžiště v ose y
r_{TOU}		vzdálenost těžiště orientačního ústrojí efektoru
R_x	N	reakce v ose x
R_{xB}	N	reakce v ose x bodu B
R_y		reakce v ose y
R_{yB}	N	reakce v ose y bodu B
β	°	vrcholový úhel metrického závitu
β_k		součinitel přídavného krutu
\check{S}	mm	šířka
t	mm	rozteč řemene
tc	s	celkový čas
tj.		to je
tr	s	čas rozběhu
tzn.		to znamená
V	mm	výška
z_1		počet zubů řemenice hnací (spojena s pohonem)
z_2		počet zubů řemenice hnané (spojena s OÚ efektoru)
z_e		počet zubů v záběru řemenic
$\alpha = 45$	°	úhel naklopení manipulátoru
ε		úhlové zrychlení
ε_r	rads^{-1}	úhlové zrychlení při rozběhu
τ_{Ds}	Mpa	dovolené napětí ve stříhu pro konstrukční ocel hřídele
φ_r	°	dráha rozběhu
ω	rads^{-1}	úhlová rychlost OÚ efektoru
ω		úhlová rychlost

ÚVOD

V diplomové práci se zabývám návrhem posledního článku manipulátoru mobilního robotu (dále jen MR) *HERCULES* a rozšířením manipulátoru o jeden stupeň volnosti pro zlepšení orientace objektu manipulace. V současnosti je celý nosný subsystém již řešen. MR Hercules je vybaven manipulátorem, který se pohybuje ve sférickém souřadném systému se třemi stupni volnosti. Tato manipulační nadstavba je připojena na mobilní podvozek a veškeré pohyby jsou dálkově řízeny operátorem.

Na poslední pohybovou jednotku jsou připojeny dvě stereovizní kamerové hlavy a laserový snímač vzdálenosti. U všech tří rotačních pohybů je použita identická transformace pohybu, které uskutečňují pohonné jednotky připojené na řídicí systém MR a ty jsou napájeny stejnosměrným napětím o velikosti 24 V.

Manipulátor robotu je vybaven třemi stupni volnosti bez orientačního ústrojí efektoru, což znamená, že je omezena orientace objektu manipulace. S vedoucím práce jsem se domluvil na orientačním ústrojí o jednom stupni volnosti, a to pro naklápění efektoru o $\pm 90^\circ$.

V první části diplomové práce se nejprve zaměřím na rešerši orientačního ústrojí. Nastíním jeho vlastnosti, popis, typy a vyráběné konstrukce. Tato rešerše bude pro mě přínosem v inspiraci při tvorbě návrhu orientačního ústrojí.

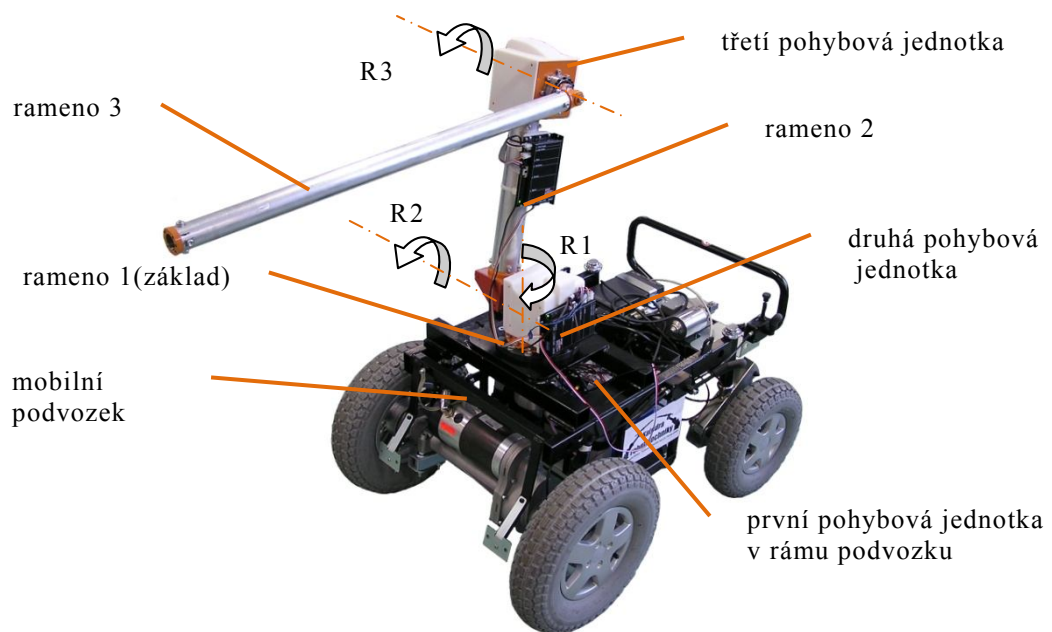
Dalším úkolem je sestavit varianty řešení polohovací jednotky. Propracovanost každého návrhu by měla být na takové úrovni, aby bylo možné vybrat jednu variantu, která bude nejlépe vyhovovat požadavkům kladeným na manipulátor MR Hercules.

Následujícím úkolem je zpřesnění a kontrola hlavních uzlů vybrané varianty tak, aby bylo možné ji realizovat, dále navrhnout a zkontrolovat pohon pro přenos krouticího momentu na orientační ústrojí efektoru.

Dalším bodem diplomové práce je kontrola stávající pohonné jednotky. Limitní hodnoty pohonné jednotky by neměly být překročeny. V případě překročení limitních hodnot je potřeba stanovit doporučená opatření.

V neposlední řadě je potřeba zhotovit výkresovou dokumentaci navrženého ramene MR Hercules.

V závěrečném hodnocení budou shrnuty dosažené výsledky a stanovena další doporučení v řešení problematiky s posledním článkem MR Hercules.



Obr. 1.1-1 Popis výkonného subsystému MR Hercules

1 POŽADAVKOVÝ LIST

1.1 Název

Konstrukční návrh posledního článku manipulátoru MR Hercules a optimalizace jeho pohonné jednotky.

1.2 Parametry MR Hercules

Nosnost:

⇒ min. 5 kg (objekt manipulace + efektor)

Technologičnost konstrukce:

⇒ vybírat normalizované a katalogové součásti

⇒ přípojně rozměry vychází z druhé pohybové jednotky (možno upravit)

Požadavky na konstrukci:

⇒ minimální vzdálenost těžiště ramene od osy rotace

⇒ složitost konstrukce, náročnost na výrobu

⇒ vnější obrysové rozměry ramene

⇒ předpokládaná hmotnost konstrukce

⇒ složitost smontování převodu

⇒ přispívání hmotnosti pohonu k vyvážení ramene a tedy snížení momentu setrvačnosti na rameni

1.3 Poslední článek MR Hercules

Popis úkolu:

Realizace poslední pohybové jednotky mobilního robotu. Navrhované rameno bude připojeno na již řešenou koncepci robotu. Pohonné jednotky zůstávají stejné a navržené rameno by nemělo překročit jejich parametry. Rameno navrhnout tak, aby těžiště procházelo nebo bylo co nejvíce přiblíženo k ose rotace ramene.

Rychlost pohonu:

$$\Rightarrow 0,524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (cca } 30^\circ/\text{s)}^1$$

Nesené zařízení:

- \Rightarrow 2x stereovizní kamerová hlava
- \Rightarrow laserový snímač vzdálenosti

Hlavní délkové rozměry:

- \Rightarrow vychází z již realizovaného manipulačního subsystému pro mobilní robot Hercules

1.4 Orientační ústrojí

Popis úkolu:

Vhodně navrhnout orientační ústrojí, které se bude naklápět kolem jedné osy. Využít normalizovanou přírubu pro připojení efektoru. Snaha o oddálení pohonu na ramenu od orientačního ústrojí, z důvodu zlepšení rozložení hmot na ramenu.

Počet stupňů volnosti:

- $\Rightarrow 1^\circ$ (naklápění kolem jedné osy)

Pohon:

- $\Rightarrow = 24 \text{ V}$, vhodné umístění na posledním článku MR

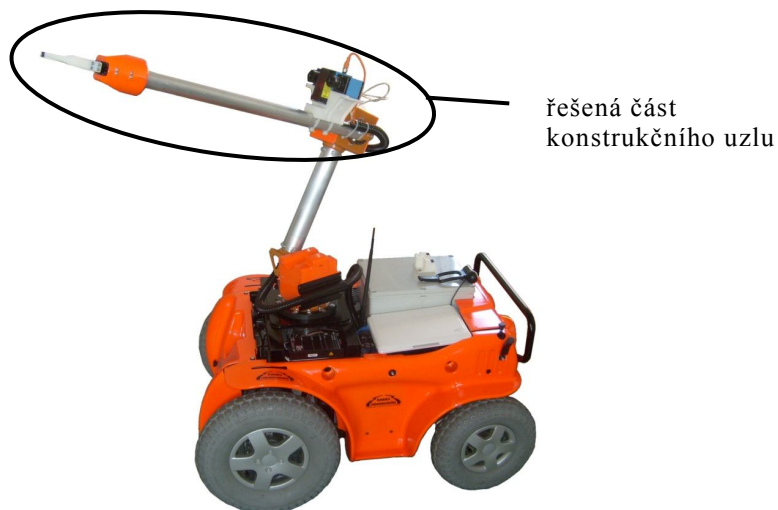
Interface:

- \Rightarrow normalizovaná příruba dle ISO 94091

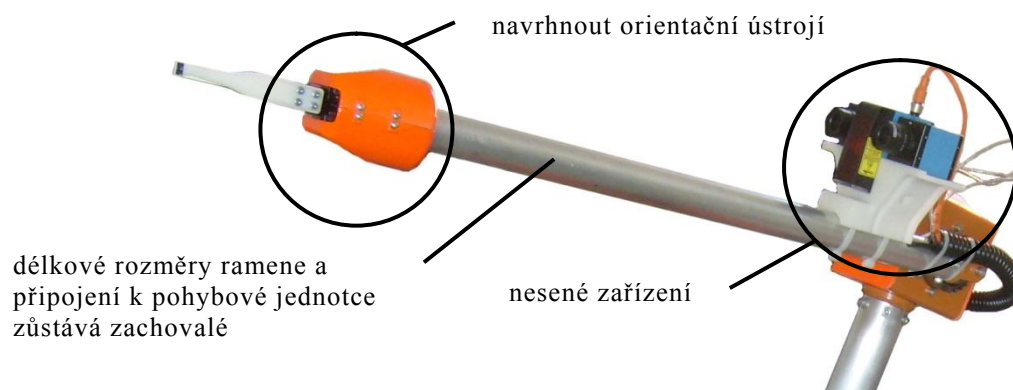
Rychlost:

- $\Rightarrow 0,785375 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (cca } 45^\circ/\text{s)}$

¹ Tato rychlost je volena podle současné rychlosti již fungující pohybové jednotky s ohledem na bezpečný provoz.

Rozsah: $\Rightarrow \pm 90^\circ$ **1.5 Fotodokumentace mobilního robotu**

Obr. 1.5-1 Mobilní robot Hercules



Obr. 1.5-2 Realizovaná pohybová jednotka

2 ORIENTAČNÍ ÚSTROJÍ

Jedná se o složitý mechanismus, který se používá u robotů na konci poslední pohybové jednotky. Orientační ústrojí (dále jen OÚ) je určeno pro snadnější pohyb robotu v prostoru. Díky tomu OÚ ve velké míře ovlivňuje pohybové schopnosti robotu. Rameno robotu polohuje s objektem manipulace v pracovním prostoru a pomocí OÚ jej orientuje kolem středu zápěstí. Střed zápěstí je bod, který vznikne protnutím os kloubu OÚ.²

Ve většině případů má OÚ dva až tři stupně volnosti, ať už s rotační nebo translační kloubovou vazbou. OÚ je konstruováno tak, aby se snadno připojilo k ramenu robotu. Na konec OÚ se umísťuje normalizovaná příruba nazývaná jako interface, na kterou se připojí efektor robotu. Z důvodu minimalizace hmotnosti a momentů setrvačnosti na posledním článku robotu je snahou oddálit pohon OÚ na druhý konec poslední pohybové jednotky. V tomto případě slouží pohon jako protizávaží a snižuje potřebný výkon pohonu následující pohybové jednotky.³

Vlastnosti OÚ⁴:

- ⇒ minimální hmotnost, vnější rozměry, moment setrvačnosti
- ⇒ sférický pohyb
- ⇒ robustní konstrukce
- ⇒ velký pracovní prostor
- ⇒ vysoká tuhost
- ⇒ vysoká přesnost a opakovatelnost
- ⇒ pohon OÚ přemístěn na konci pohybové jednotky

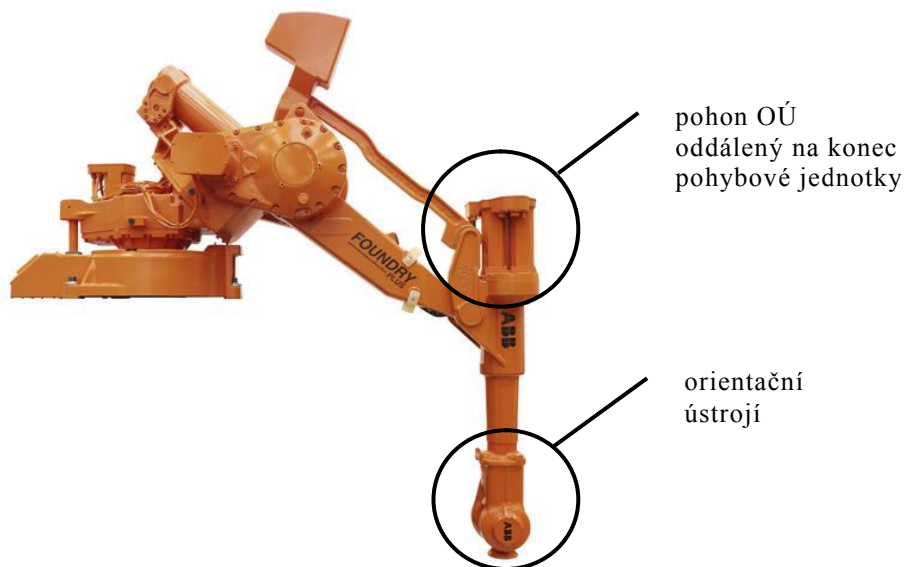
² SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

³ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

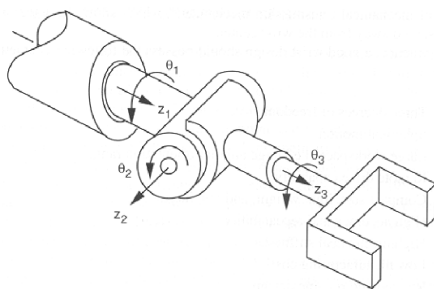
⁴ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

2.1 Popis a skladba orientačního ústrojí

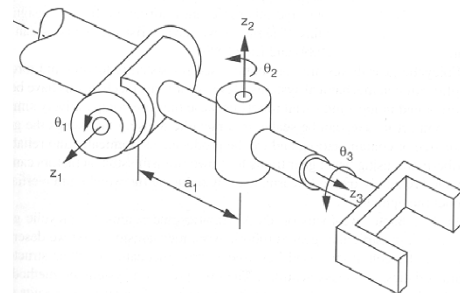
Na obr. 2.1-1 je znázorněn robot od firmy ABB. Jedná se o typ IRB 4400. Robot má OÚ se třemi stupni volnosti vykonávající sférický pohyb. Pohony jsou umístěny na konci pohybové jednotky a svojí hmotností přispívají k vyvážení robotu.



Obr. 2.1-1 Robot firmy ABB s OÚ o třech stupních volnosti



Obr. 2.1-2 Sférický pohyb



Obr. 2.1-3 Nesférický pohyb

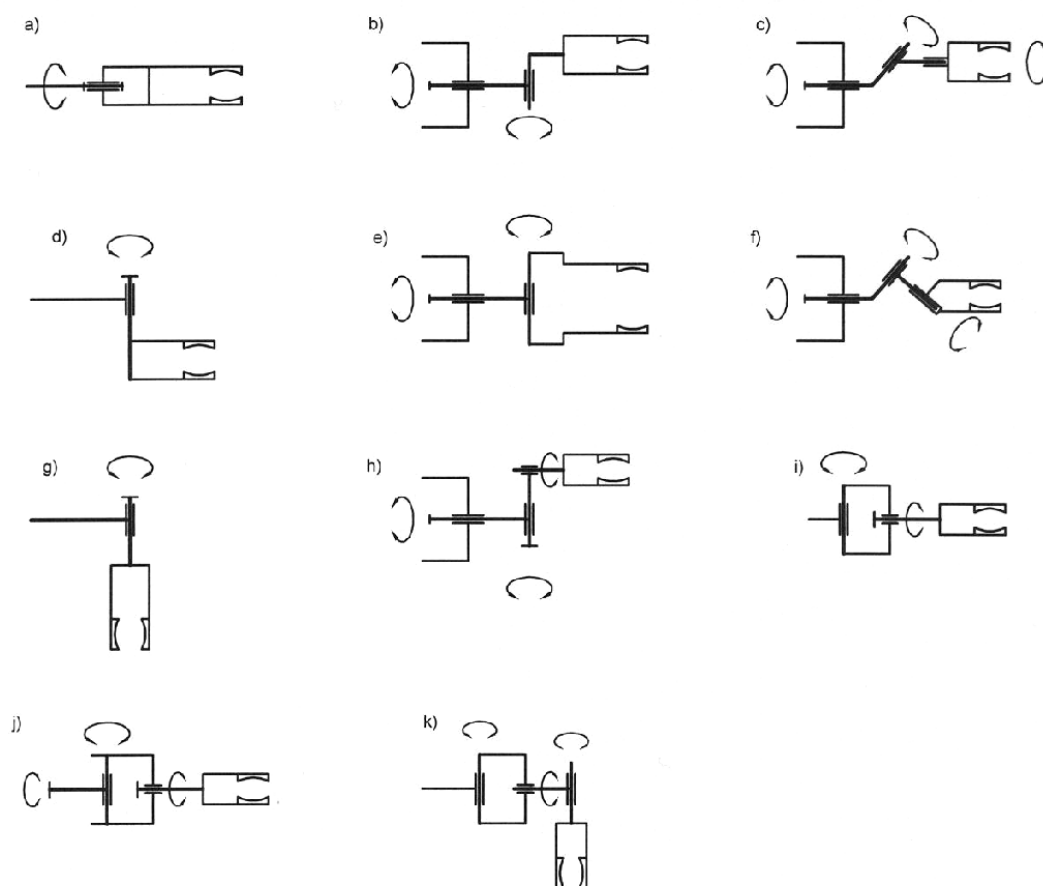
Na obr. 2.1-2 je znázorněno OÚ, které vykonává sférický pohyb. Je zde dobře patrný střed zápěstí, který by vznikl v místě protnutí os kloubů z_1 , z_2 a z_3 .⁵

⁵ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

Naproti tomu je na obr. 2.1-3 zobrazeno OÚ, které vykonává nesférický pohyb. Osa kloubu z_2 je posunuta o vzdálenost a_1 od osy z_1 . Protnutím osy z_1 a z_3 vznikne střed zápěstí.

2.2 Typy provedení orientačního ústrojí

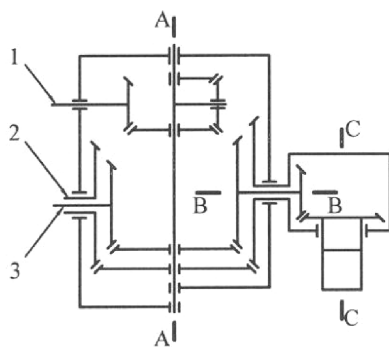
Přehled typů základních konstrukcí je zobrazen na obr. 2.2-1. Tyto na první pohled jednoduché konstrukce se stávají složitými v okamžiku, kdy začneme oddalovat pohon od OÚ na konec ramene. Tím je nutné rotační pohyb daného kloubu nějakým způsobem přenést tak, aby neovlivňoval pohyb ostatních kloubů.



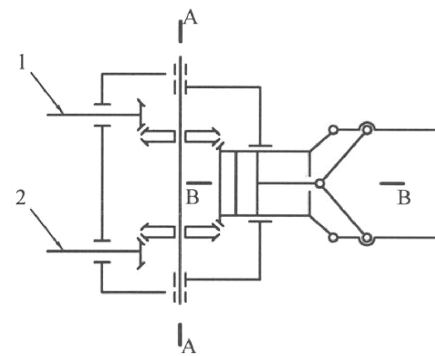
Obr. 2.2-1 Typy konstrukce orientačního ústrojí

Na obr. 2.2-2 je znázorněné OÚ se třemi stupni volnosti. Motory i s převodovkami jsou umístěné na konci pohybové jednotky a na výstupu se tedy přenáší krouticí moment s potřebnou úhlovou rychlostí. Rotační

pohyb je dále přenášen pomocí kuželových ozubených kol. Prostřednictvím těchto převodů je možné ještě doladit převodový poměr. Protože roboty pracují s elektropohony, které mají vysoké otáčky, je nutné tyto otáčky redukovat pomocí použití některých převodovek s vysokými převodovými poměry (nejčastěji harmonické, cykloidní a planetové převodovky). Hlavní převod je tedy v převodovce a doladění se děje na ozubených kolech. Otáčením hřídele 1 se docílí naklápění kolem osy A-A. Rotací hřídele 2 dojde k otáčení kolem osy B-B, která je umístěna osově s hnacím hřídelem. Tato hřídel je zkonstruována jako dutá a je do ní vložena hřídel 3, která svou rotací vyvolá otáčivý pohyb kolem osy C.⁶



Obr. 2.2-2 OÚ s použitím tří pohonů



Obr. 2.2-3 OÚ s použitím dvou pohonů

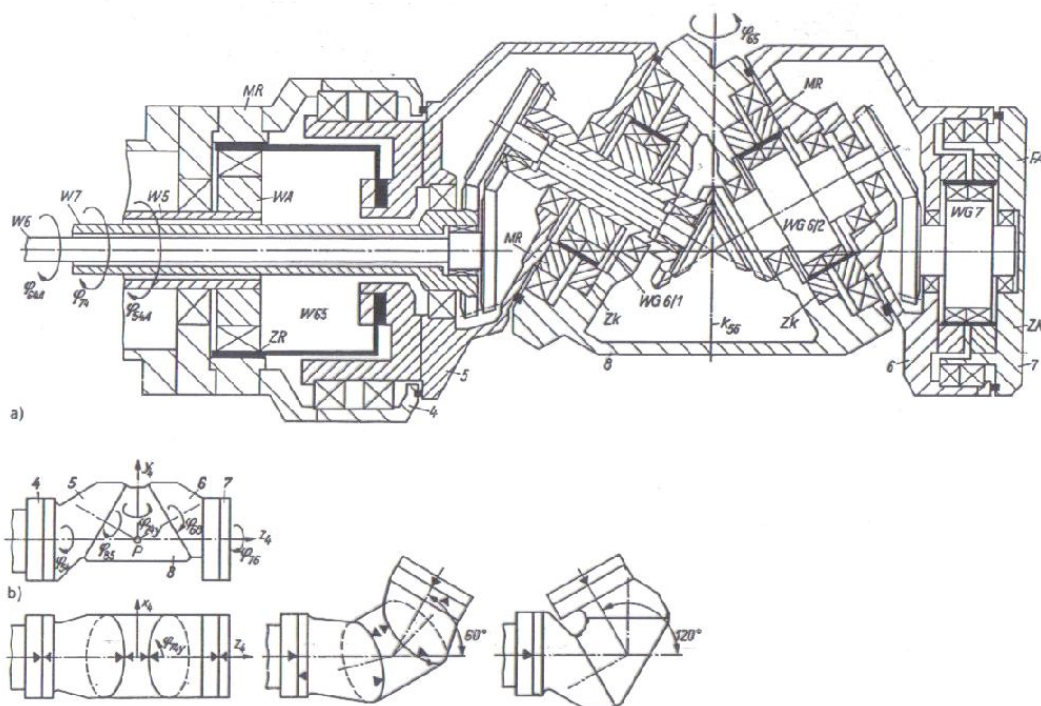
Obr. 2.2-3 zobrazuje příklad konstrukce, kde je využito diferenciálního řízení pomocí dvou pohonů. Hřídele od pohonu jsou označeny čísly 1 a 2 a jsou propojeny pomocí kuželových ozubených kol s koly s oboustranným ozubením, tzv. talířově oboustranně ozubená kola. Ty zabírají do ozubeného věnce pevně spojeného s efektozem. Diferenciální řízení u této konstrukce je realizováno pomocí dvou pohonů. Otáčí-li se oba dva pohony současně stejnou úhlovou rychlostí proti sobě, bude se část skříně OÚ naklápět kolem osy A-A. Budou-li se pohony otáčet stejnou úhlovou rychlostí ve stejném směru, dojde k rotaci celého OÚ kolem osy B-B. U této konstrukce je také použit lineární pohon, který rozevívá čelisti kloubového efektoru.⁷

⁶ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

⁷ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

2.3 Konstrukční řešení orientačního ústrojí

Řez OÚ se čtyřmi stupni volnosti pohybující se ve sférických souřadnicích je zobrazen na obr. 2.3-1. Je zde vidět provedení konstrukce a pohyby, jaké OÚ vykonává. Pomocí dutých hřídelů jsou klouby propojeny s pohony, ty jsou umístěny na druhém konci pohybové jednotky. Kroucí momenty jsou přenášeny kuželovými ozubenými koly.⁸



Obr. 2.3-1 Řez orientačním ústrojím

⁸ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.



Obr. 2.3-2 Robot IRB 5500

Na obr. 2.3-1 je znázorněn řez OÚ, které je aplikované na robotu firmy ABB s.r.o. zobrazeném na obr. 2.3-2. Jedná se o robot, který se používá k lakování. Jeho výhodou je velký rozsah pohybu, který je potřebný pro snazší dosah lakovací hubice v místě lakování.⁹

2.4 Používané orientační ústrojí v praxi

V této podkapitole znázorňuji na obrázcích typy OÚ, které se používají v praxi. Ve většině případů jsou pohony umístěné na opačném konci ramene a slouží k jeho vyvážení. Také je patrné, že převládají OÚ sférického typu.

2.4.1 Mobilní roboty

Na obrázcích jsou znázorněny některé typy servisních robotů. Je patrné, že nosné subsystemy robotu jsou velmi podobné těm průmyslovým (ukázky průmyslových robotů jsou v následující podkapitole), s tím rozdílem, že je zde použit mobilní podvozek pro přemístění robotu. Každý z těchto mobilních robotů je určen k použití pro daný typ úkolů a jeho nosný výkonný subsystem je tomu přizpůsoben.

⁹ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.



Obr. 2.4-1 Mobilní robot PIAP 1

Mobilní robot PIAP1 byl sestaven pro monitorování a případné zásahy v letadlech, autobusech, vlacích a jiných veřejných dopravních prostředcích.¹⁰



Obr. 2.4-2 Servisní robot SMF

Tento robot byl vyvinut pro monitorování v jaderné elektrárně v ruském Černobylu, kde po explozi reaktoru v roce 1986 se uvolnilo obrovské množství radioaktivního odpadu.

Vlastnosti:

- dálkově ovladatelný ve vzdálenosti do 40 km
- radiační odolnost až do výše $100.000 \text{ rad} \cdot \text{h}^{-1}$
- nosnost manipulátoru: 250 kg na 3000 mm¹¹

¹⁰ PIAP. *Army-technology.com* [online]. 1997 [cit. 2010-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap1.html>>.

¹¹ SMF - HEAVY MANIPULATOR VEHICLE - AMERICAN CRANE AND EQUIPMENT CORPORATION. *American Crane and Equipment Corporation (ACECO)* [online]. 2009 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.americancrane.com/Telerob/HMV.htm>>.



Obr. 2.4-3 Servisní robot Brouček

Dálkově ovládaný robot je určený pro zásahy v rizikovém prostředí, při požáru, v prostředí s nebezpečím výbuchu a při chemickém nebo biologickém ohrožení.

Využití:

- manipulovatelnost s předměty o hmotnosti do 150 kg, např. s tlakovými láhvemi
- hasit požár proudnicí nesenou na paži
- pomocí čelistí stříhat hadice, dráty nebo lana
- provádět průzkum nebezpečné oblasti¹²



Obr. 2.4-4 WARRIOR X700

Tento robot je výrobkem americké armády. Jeho kloubové rameno s nosností 150 liber (cca 68 kg) se používá pro výměnu zbraní.¹³

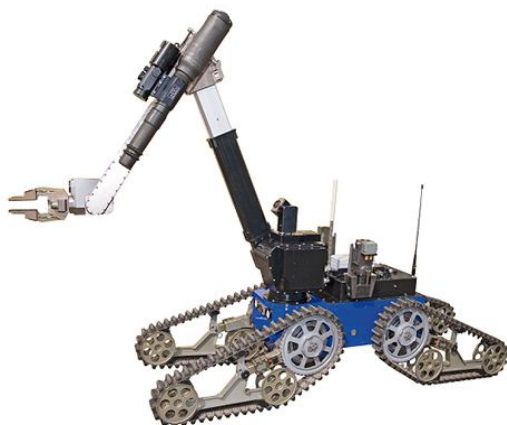
¹² Požární robot BROUČEK I. *Qido agazín* [online]. 2002 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.quido.cz/260/tyden.htm>>.

¹³ New iRobot Warrior X700 Carries Big Payloads and Big Guns. *Gizmodo* [online]. 2007 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://gizmodo.com/312093/new-irobot-warrior-x700-carries-big-payloads-and-big-guns>>.



Obr. 2.4-5 Mobilní robot Andros

Robot Andros je určen pro monitorování a zásahy v rizikovém prostředí. Jeho servisní činnost napomáhá americké armádě v nejrůznějších misích. Rameno manipulátoru má sedm stupňů volnosti.¹⁴



Obr. 2.4-6 Mobilní robot TELEX

Mobilní robot TELEX je určen pro pyrotechnické zásahy. Jeho štíhlá konstrukce s velkým dosahem umožní pohyb v omezených prostorech.¹⁵

¹⁴ F6A - The Industry's Most Versatile Platform. *Northrop Grumman* [online]. 2010 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <http://www.is.northropgrumman.com/by_solution/remote_platforms/product/index.htm>.

¹⁵ Telex - American Crane and Equipment Corporation. *American Crane and Equipment Corporation (ACECO)* [online]. 2009 [cit. 2010-01-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.americancrane.com/Telerob/telex.htm>>.



Obr. 2.4-7 Mobilní robot PIAP 4

Inspekční mobilní robot PIAP 4 může manipulovat s nebezpečným zařízením do 60 kg¹⁶



Obr. 2.4-8 Mobilní robot ECA

Mobilní robot ECA je využíván pro manipulaci a neutralizaci nebezpečných předmětů.¹⁷

2.4.2 Průmyslové roboty

V této podkapitole popíši některé průmyslové roboty, jež se vyznačují svým typickým i atypickým tvarem posledního ramene. Jsou to roboty od firem ABB s.r.o. a Kuka s.r.o. Na obrázcích je patrné, že pohony robotů jsou umístěny na konci jejich ramen, aby nesnižovaly nosnost robotů, nezvyšovaly setrvačné účinky a vnější rozměry ramen.

¹⁶ PIAP. *Army-technology.com* [online]. 1997 [cit. 2010-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap4.html>>.

¹⁷ ECA - Mobile Security and CBRN Robots. *Army-technology.com* [online]. 1997 [cit. 2010-01-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap4.html>>.

<http://www.abb.cz/product/us/9AAC100735.aspx>



Obr. 2.4-9 IRB 6400



Obr. 2.4-10 IRB 540



Obr. 2.4-11 IRB 5500



Obr. 2.4-12 IRB 260

http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/



Obr. 2.4-13 KR 5 arc HW



Obr. 2.4-14 KR 5 arc



Obr. 2.4-15 KR 30 L16-2

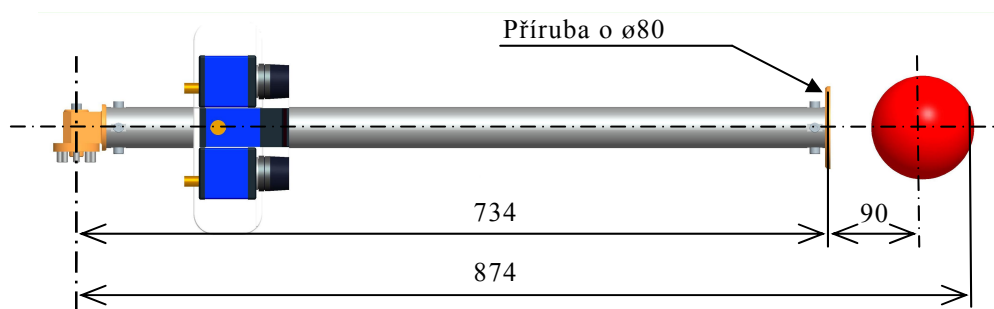


Obr. 2.4-16 KR 15 SL

3 ANALÝZA POSLEDNÍHO ČLÁNKU MANIPULÁTORU A STÁVAJÍCÍ POHONNÉ JEDNOTKY

Hlavní rozměry potřebné pro návrhy posledního článku manipulátoru zjistím z již navrženého nosného subsystému MR Hercules. Vedoucí práce mi poskytl model realizované nadstavby v software Pro\ENGINEER, ze které získám informace o hlavních rozměrech navrhovaného ramene a pohonné jednotky.

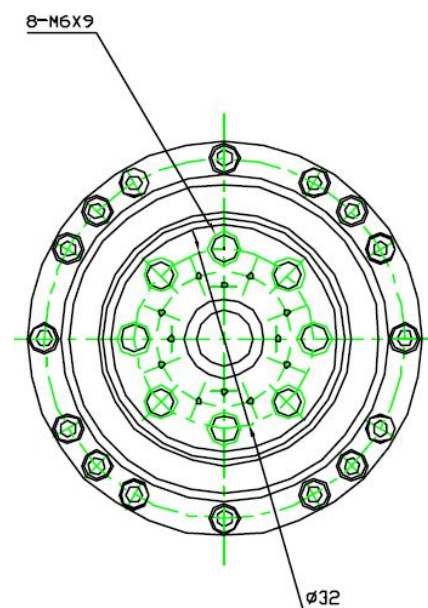
3.1 Hlavní délkové rozměry



Obr. 3.1-1 Analýza rozměru realizované pohybové jednotky

3.2 Rozměry převodovky

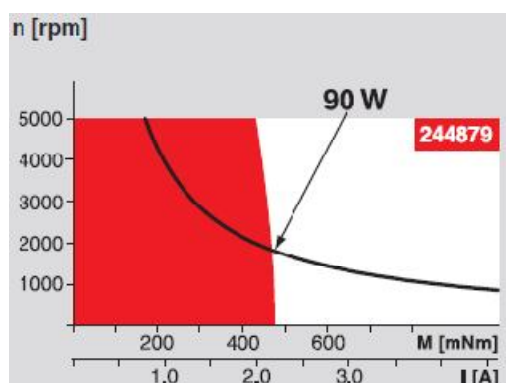
Rameno pohybové jednotky je uchyceno k harmonické převodovce, která zároveň slouží jako ložiskový domek. Pro uchycení ramene se používá osm šroubů se závitem M6, jež jsou rozmístěny na roztečné kružnici o průměru 32 mm, jak je znázorněno na obr. 3.1-1. Harmonická převodovka je od firmy Harmonic drive LLC. Jedná se o typ CSG_20_2UH.



Obr. 3.1-1 Připojovací rozměry harmonické převodovky

3.3 Parametry pohonné jednotky

Manipulační nadstavba MR Herkules disponuje stejnosměrným deskovým motorem od firmy Maxon motor ag s označením EC 90 FLAT, v kombinaci s harmonickou převodovkou firmy Harmonic Drive LLC s označením CSG_20_2UH s převodovým poměrem 1:160. Tato kombinace je použita u všech rotačních jednotek manipulátoru. V následujících dvou tabulkách vypisují parametry pohonné jednotky.



Obr. 3.3-1 Momentová charakteristika motoru Maxon



Obr. 3.3-2 EC 90 flat

Tab. 3.3-1 Parametry motoru EC 90 FLAT¹⁸

PARAMETRY MOTORU (346970)	HODNOTY
napájecí napětí	36 V
výkon	60 W
otáčky bez zátěže	1560 min ⁻¹
proud bez zátěže	0,108 A
nominální otáčky	1240 min ⁻¹
max. trvalý krouticí moment	0,405 Nm
nominální proud	1,78 A
krátkodobý krouticí moment	3,4 Nm
startovací proud	15,6 A
účinnost	84,3 %
moment setrvačnosti	3060 gcm ²
hmotnost pohonu	713 g

¹⁸ Maxon motor ag. *Maxon motor* [online]. 2009 [cit. 2010-04-27]. Flat motors for tight spaces. Dostupné z WWW: <http://www.maxonmotor.ch/ch/en/product_overview.html>.



Obr. 3.3-3 CSG 20 2UH

Tab. 3.3-2 Parametry harmonické převodovky¹⁹

velikost převodovky	převod i_p	①	②	③	④	⑤
		Nm	Nm	Nm	Nm	kg·m ²
20	160	52	120	64	191	0.193

- ① Jmenovitý točivý moment při 2000 ot/min – označení trvale přípustného točivého momentu při vstupní rychlosti 2000 ot/min.
- ② Limit pro opakovaný točivý moment – během zrychlování nebo zpomalování dochází k nárůstu momentu setrvačnosti zatěžující harmonickou převodovku. Tato hodnota je limitem, která nesmí být překročena.
- ③ Limit pro střední hodnotu točivého momentu – průměrná hodnota zatížení pro provoz s měnícím se momentem a rychlostí.
- ④ Limit pro okamžitý točivý moment – limitní hodnota v případě kolize nebo nouzového zastavení.
- ⑤ Moment setrvačnosti převodovky.

Výpočet parametrů pohonné jednotky

Nominální moment pohonu

$$M_{knom} = M_{Mnom} \cdot i_p = 0,405 \cdot 160 = 64,8 \text{ Nm} \quad (1)$$

Krátkodobý moment pohonu

$$M_k = M_{Mmax} \cdot i_p = 3,4 \cdot 160 = 544 \text{ Nm} \quad (2)$$

¹⁹ Harmonis Drive LLC. CSG-2UH [online]. 2010 [cit. 2010-05-13]. Gearheads. Dostupné z WWW: <<http://www.harmonicdrive.net/products/gearheads/csg-unit/>>.

Krátkodobý moment pohonu (M_k) je teoretická hodnota, jehož je pohon schopen dosáhnout v kombinaci s převodovkou. Avšak limitní hodnota harmonické převodovky pro krátkodobý moment je 120 Nm, což je hodnota zatížení pohonných jednotek, která nesmí být při pohybu manipulátoru MR překročena.

4 NAVRŽENÉ VARIANTY ŘEŠENÍ RAMENE

V této kapitole se zabývám navržením variant, kterými řeším problém s návrhem poslední pohybové jednotky a orientačního ústrojí efektoru. Tyto varianty budou zpracovány v softwaru Pro/ENGINEER, což je nástroj pro podporu konstruování. Na obrázcích popíši navržené varianty pro přenos pohybu z pohonu na orientační ústrojí (OÚ) a způsob umístění pohonu na posledním rameni MR Hercules.

Výsledkem navržených variant bude metodický postup pro určení nejvhodnější varianty dané problematiky řešení pomocí tzv. hodnotové analýzy a konečný výběr, pro kterou variantu jsem se rozhodl.

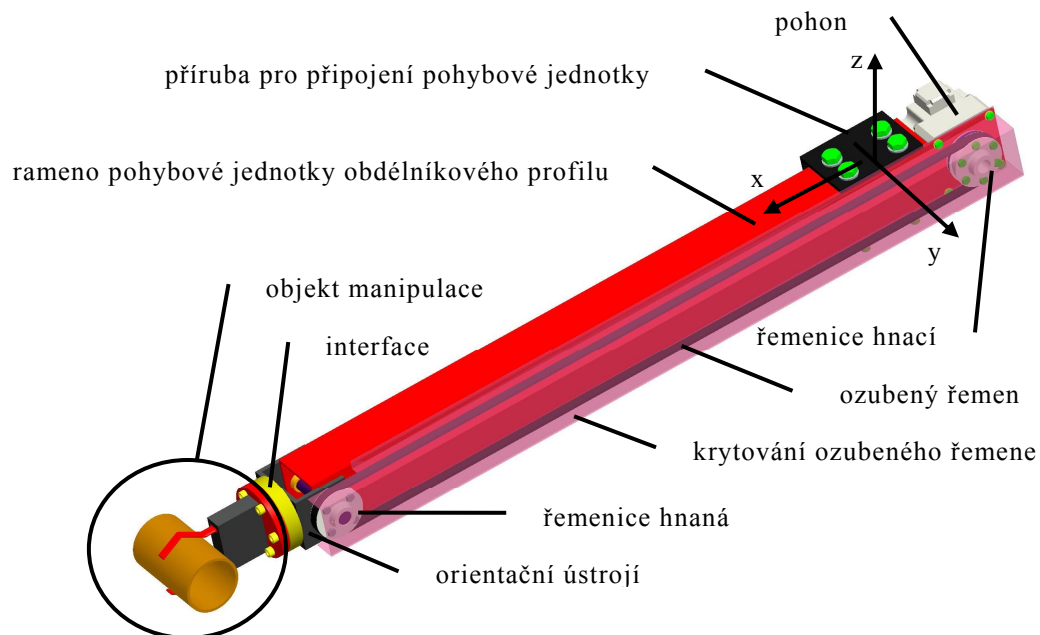
4.1 Řemenový převod

Pohon u řemenového převodu je umístěn na opačném konci ramene než je OÚ efektoru a krouticí moment je přenášen pomocí ozubeného řemene. Ozubený řemen je v robotice často využíván pro přenos rotačního pohybu na osově vzdálené hřídele nesoucí řemenice.

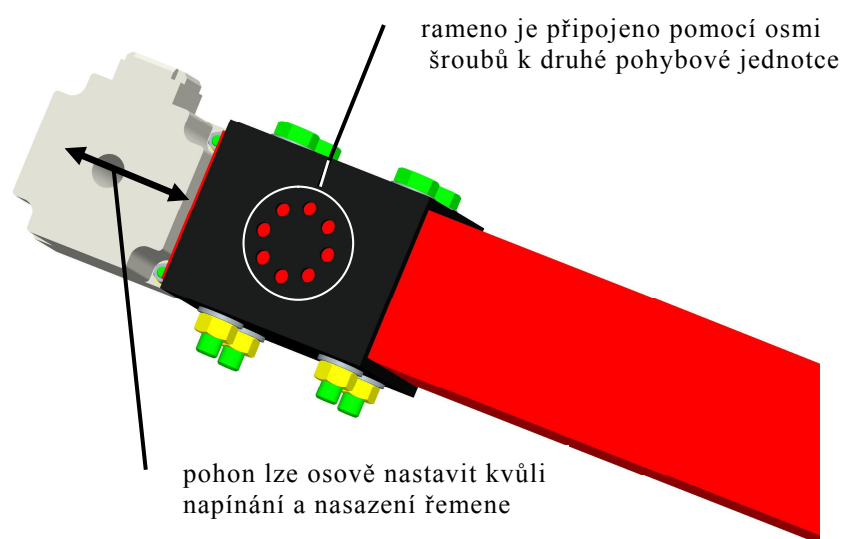
Pohon je připevněn k rámu a pro napínání ozubeného řemene je možné s pohonem osově posouvat. Dalším způsobem napínání ozubeného řemene je pomocí napínacího mechanismu. Hnaná řemenice je pevně spojena s pohyblivou částí OÚ (viz podkapitola detailní popis varianty)

4.1.1 Detailní popis varianty

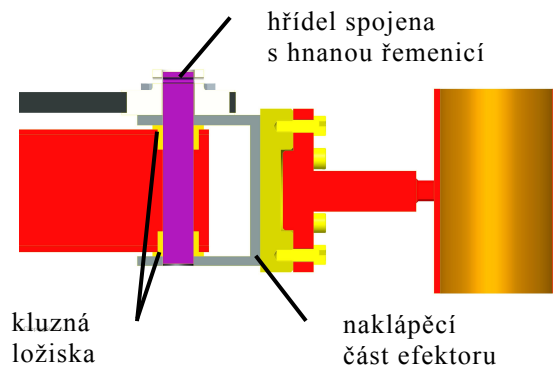
Na následujících obrázcích je znázorněna navržená varianta s detailním popisem rozmístění jednotlivých uzlů na pohybové jednotce a funkčnosti OÚ.



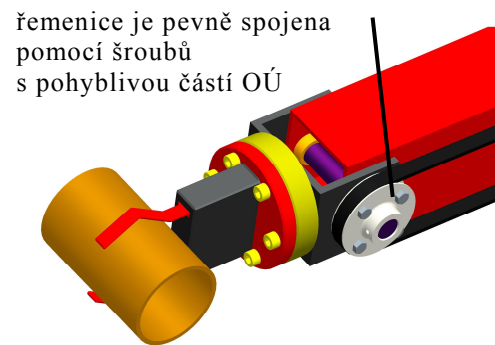
Obr. 4.1-1 Varianta s ozubeným řemenem



Obr. 4.1-2 Připojení ramene k nosnému subsystému robotu



Obr. 4.1-3 Zobrazení OÚ v řezu



Obr. 4.1-4 Detail OÚ

Výhody:²⁰

- velmi tichý chod
- tlumí kmitání, chvění
- snáší velmi vysoké obvodové rychlosti
- nízké náklady na provoz
- možnost funkce pojistné spojky při přetížení
- není nutno mazat
- pohon přispívá svou hmotností k vyvážení ramene
- možnost vyvážení statických účinků lepším rozložením hmot na rameni
- snížená setrvačnost
- malé vnější rozměry konstrukce

Nevýhody:²¹

- nutné napínání řemene = namáhání ložisek
- opotřebení řemenů
- nízká tuhost převodu
- špatná odolnost vůči vysokým teplotám, vlhkosti, prachu a nečistotám
- nutnost krytování převodu

²⁰ Katedra konstruování strojů : Příručka - Řemanový převod [online]. 2003 [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: <http://www.kks.zcu.cz/pro-studenty-KKS/Studijni_podklady/PRIRUCKA/CADIS/MDOC/F/F15/F15_2/f15_2.htm>

²¹ Katedra konstruování strojů : Příručka - Řemanový převod [online]. 2003 [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: < http://www.kks.zcu.cz/pro-studenty-KKS/Studijni_podklady/PRIRUCKA/CADIS/MDOC/F/F15/F15_2/f15_2.htm>

4.1.2 Parametry ramene

Ze softwaru Pro/ENGINEER jsem zjistil fyzikální vlastnosti ramene. Důležité jsou pro mě zejména informace týkající se hmotnosti ramene a polohy jeho těžiště od osy rotace R3 dle Obr. 1.1-1. Tyto informace pak použiji při porovnávání vhodnosti jednotlivých variant pomocí některé z analýz metodiky konstruování. Zavedení souřadného systému je zobrazeno na obr. 4.1-1.

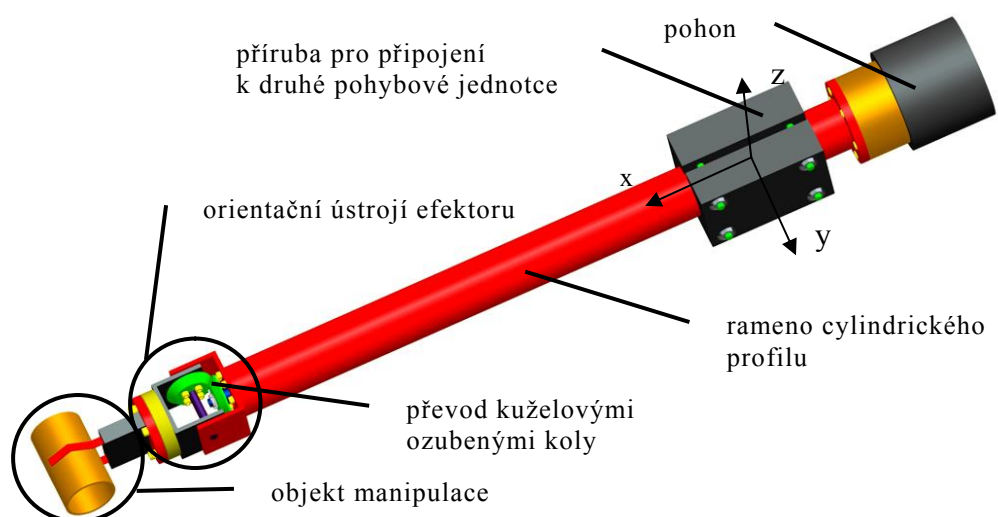
```
VOLUME = 1.6217492e+06 MM^3  
SURFACE AREA = 9.3246154e+05 MM^2  
AVERAGE DENSITY = 7.9963464e-09 TONNE / MM^3  
MASS = 1.2968068e-02 TONNE  
  
CENTER OF GRAVITY with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame:  
X Y Z 4.4856729e+02 2.9979330e+00 6.9082131e-02 MM  
  
INERTIA with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame: (TONNE * MM^2)  
  
INERTIA TENSOR:  
Ixx Ixy Ixz 1.4853020e+01 -1.2697444e+01 5.9266587e-02  
Iyx Iyy Iyz -1.2697444e+01 4.1415068e+03 4.0226887e-02  
Izx Izy Izz 5.9266587e-02 4.0226887e-02 4.1422444e+03
```

Obr. 4.1-5 Parametry ramene

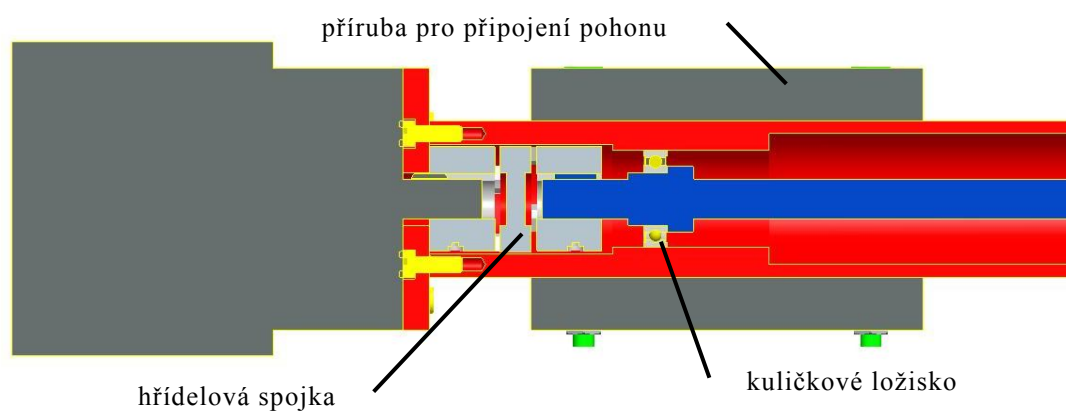
4.2 Převod kuželovými ozubenými koly

Tato varianta je v robotice často využívána. Rotační pohyb vyvozený od pohonu je přenášen pomocí hřídele vložené do tzv. duté hřídele. Pohon je umístěn na opačném konci ramene než efektor, čímž přispívá k jeho vyvážení. Hřídel nesoucí kuželové ozubené kolo je uložena v ložiscích. Spolu zabírající kuželová ozubená kola, která mají osu rotace na sebe kolmou, přenáší rotační pohyb na orientační ústrojí efektoru. Mezi hřídelí a pohonem je umístěna hřídelová spojka, která se používá k vyrovnání výrobních nepřesností mezi hřídelí a pohonem. Tím dochází k plynulému chodu mechanismu. Pohon je pomocí příruby připevněn na konec ramene. Celé rameno se připevní na výkonný subsystém mobilního robotu prostřednictvím šroubů umístěných v přírubě. Detailnější popis a grafické zobrazení převodu kuželovými ozubenými koly je v následující podkapitole.

4.2.1 Detailní popis varianty



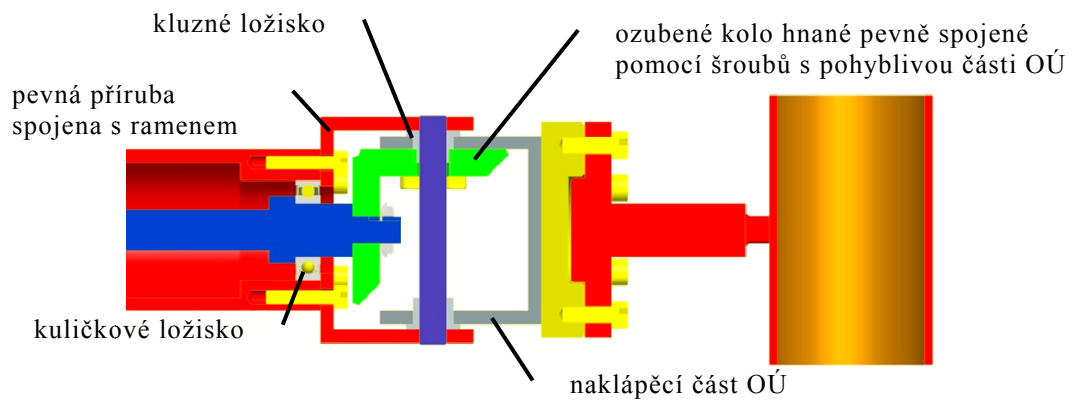
Obr. 4.2-1 Převod kuželovými ozubenými koly



Obr. 4.2-2 Řez hnací částí



Obr. 4.2-3 Řez celé pohybové jednotky



Obr. 4.2-4 Řez orientačním ústrojím

Výhody:²²

- nejjednodušší ozubený převod pro různoběžné úhly os hřídelů
- poměrně vysoká účinnost až 96%
- dobrá spolehlivost a životnost
- štíhlá konstrukce
- pohon přispívá ke statickému vyvážení konstrukce
- dobrá mechanická účinnost
- přesné dodržení převodového poměru
- schopnost přenosu velikých výkonů až 100 kW při obvodových rychlostech optimálně do $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (extrémně až $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- schopnost dosažení vysokých převodů
- krátkodobá přetížitelnost

Nevýhody:²³

- drahá výroba
- složitější konstrukční uspořádání
- kromě délkových úchylek nutno sledovat i úchyly úhlové
- nároky na přesnost a tuhost uložení
- větší hmotnosti

²² Katedra konstruování strojů : Příručka – kuželová soukolí [online]. 2003 [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: < http://www.kks.zcu.cz/pro-studenty-KKS/Studijni_podklady/PRIRUCKA/CADIS/MDOC/F/F12/F12_3/f12_3.htm >

²³ Katedra konstruování strojů : Příručka – kuželová soukolí [online]. 2003 [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: < http://www.kks.zcu.cz/pro-studenty-KKS/Studijni_podklady/PRIRUCKA/CADIS/MDOC/F/F12/F12_3/f12_3.htm >

- zabránění vniku nečistot mezi ozubení
- hluk a chvění

4.2.2 Parametry ramene

Zavedený souřadný systém pro určení parametrů varianty s kuželovými ozubenými koly je na obr. 4.2-1.

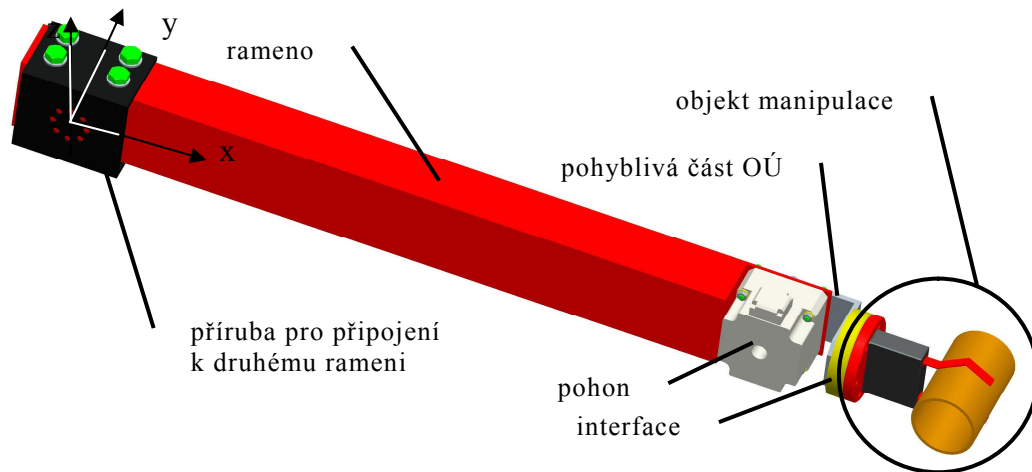
```
VOLUME = 3.9247746e+06 MM^3  
SURFACE AREA = 7.2556283e+05 MM^2  
AVERAGE DENSITY = 3.4805828e-09 TONNE / MM^3  
MASS = 1.3660503e-02 TONNE  
  
CENTER OF GRAVITY with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame:  
(X) Y Z 3.6993363e+02 -6.4497927e-02 -1.4202407e-02 MM  
  
INERTIA with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame: (TONNE * MM^2)  
  
INERTIA TENSOR:  
box bxy bxz 1.4736381e+01 -9.7880055e-01 1.4169726e-01  
lyx lyy lyz -9.7880055e-01 3.8128597e+03 0.0000000e+00  
lzx lzy lzz 1.4169726e-01 0.0000000e+00 3.8135148e+03
```

Obr. 4.2-5 Parametry ramene

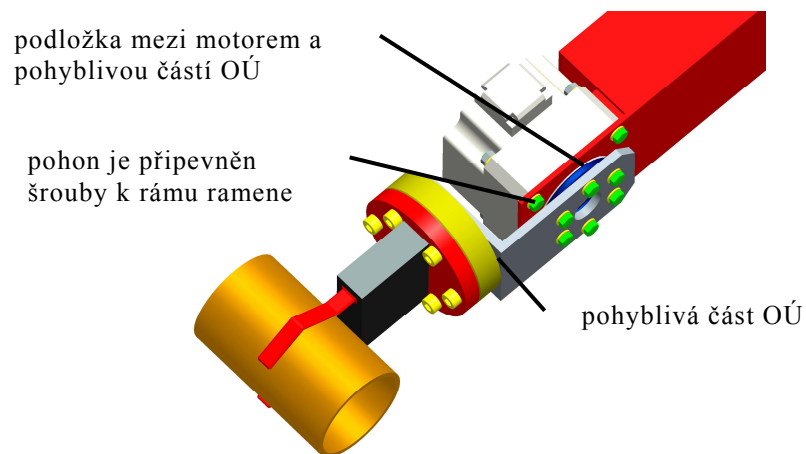
4.3 Pohon umístěný v kloubu OÚ

Pohon je u této varianty uložen na konci ramene, kde je spojen s pohyblivou částí OÚ efektoru. Pohon přispívá svou hmotností k nevyvážení ramene a snižuje nosnost robotu. Dále se zvyšují setrvačné účinky při pohybu nadstavby mobilního robotu. Rozměry pohonu zvětšují vnější rozměry celého ramene, čímž je zvětšen objem kolizního prostoru. Kolizní prostor je objem, který zabírá konstrukce robotu, a tím omezuje jeho rozsah pohybu. Z hlediska konstrukce je varianta, kdy je pohon uložen přímo v kloubu ramene, velmi jednoduchá. Odpadá osově vzdálený přenos pohybu mezi pohonem a kloubem. Popis a grafické znázornění varianty, kdy je pohon uložen v kloubu, popisují v další podkapitole.

4.3.1 Detailní popis varianty



Obr. 4.3-1 Pohon umístěný v kloubu OÚ



Obr. 4.3-2 Detail OÚ

Výhody:

- jednoduchá konstrukce
- pohon přímo v kloubu OÚ, vysoká účinnost
- provoz s minimální vůlí

Nevýhody:

- pohon zvyšuje dynamické a setrvačné účinky
- nosnost robotu je snížena o hmotnost pohonu
- rameno robotu není vyvážené
- větší rozměry ramene = velký kolizní prostor

4.3.2 Parametry ramene

Zavedený souřadný systém varianty s pohonem umístěným v kloubu OÚ efektoru pro určení parametrů ramene je zobrazen na obr. 4.3-1.

```
VOLUME = 1.3092485e+06 MM^3
SURFACE AREA = 5.7426337e+05 MM^2
AVERAGE DENSITY = 9.3560287e-09 TONNE / MM^3
MASS = 1.2249366e-02 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame:
X Y Z 5.1377983e+02 4.7785209e-01 1.3693697e-01 MM

INERTIA with respect to ASM_DEF_CSYS coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Iyy Ixz 1.3236554e+01 -4.0782561e+00 -1.4863489e+00
Iyx Iyy Iyz -4.0782561e+00 4.2647312e+03 4.2051249e-02
Izx Iyz Izz -1.4863489e+00 4.2051249e-02 4.2627085e+03
```

Obr. 4.3-3 Parametry ramene

5 VOLBA OPTIMÁLNÍHO ŘEŠENÍ RAMENE ROBOTU

V této kapitole se zabývám volbou řešení ramene z navržených variant. Úkolem je porovnat tyto varianty na základě několika kritérií a zvolit optimální variantu pro danou úlohu řešení.

Metodou, kterou jsem vybral pro analýzu jednotlivých variant, je hodnotová analýza. Pro porovnání zvolených kritérií použiji metodu porovnávání v trojúhelníku páru. Tím určím významnost jednotlivých kritérií.

V dalším postupu hodnotím jednotlivé varianty podle zvolených kritérií. Ta varianta, která bude podle hodnotové analýzy a podle mého rozhodnutí nejlépe vyhovovat, bude dále konstrukčně zpřesněna a doložena potřebnými výpočty.

5.1 Hodnotová analýza

Kritéria, jež vstupují do hodnotové analýzy, vybírám na základě požadavků na konstrukci posledního ramene MR Hercules, a také na základě celkových požadavků, které jsou na roboty kladeny.

Jsou to tyto kritéria:

Tab. 5.1-1 Kritéria hodnotové analýzy

Označení kritéria	Kritérium	Charakteristika kritéria
K1	konstrukce	složitost konstrukce, náročnost na výrobu
K2	vnější rozměry	vnější obrysové rozměry ramene
K3	těžiště	vzdálenost těžiště ramene od osy rotace
K4	hmotnost	předpokládaná hmotnost konstrukce
K5	montáž	složitost smontování převodu
K6	umístění pohonu	přispívání hmotnosti pohonu k vyvážení ramene, a tedy snížení momentu setrvačnosti na rameni

Tab. 5.1-2 Přehled hodnocení kritérií

HODNOCENÍ KRITÉRIÍ	
1	vysoká úroveň
2	dobrá úroveň
3	průměrná úroveň
4	nízká úroveň
5	nevyhovující úroveň
6	nepříznivý stav

Tab. 5.1-3 Významnost kritérií

VÝZNAMNOST KRITÉRIÍ	
nejnižší	1
nejvyšší	2

Tab. 5.1-4 Hodnocení variant

KRITÉRIUM	VARIANTA A	VARIANTA B	VARIANTA C
M	A	B	C
	(ŘEMEN)	(OZUBENÁ KOLA)	(POHON V KLOUBU OÚ EFEKTORU)
K1	konstrukce 2	konstrukce 4	konstrukce 1
K2	vnější rozměry 4	vnější rozměry 2	vnější rozměry 2
K3	těžiště 2	těžiště 2	těžiště 4
K4	hmotnost 2	hmotnost 3	hmotnost 1
K5	montáž 2	montáž 3	montáž 1
K6	umístění pohonu 1	umístění pohonu 1	umístění pohonu 6

5.1.1 Metoda porovnávání v trojúhelníku páru

Touto metodou se určuje významnost jednotlivých kritérií. Mezi sebou jsou vždy hodnocena dvě kritéria. Při párování jsem významnější kritérium označil barevně. Jestliže jsou dvě varianty na stejné úrovni významnosti, označuji barevně obě tyto varianty. Počet voleb udává počet barevných kritérií. Jsou-li dvě kritéria stejně významná, tedy obě označené barevně, je počet voleb poloviční. Na počtu voleb bylo stanoveno pořadí významnosti kritérií.

Tab. 5.1-5 Významnost kritérií

POROVNÁVÁNÍ KRITÉRIÍ					POČET VOLEB v	POŘADÍ	VÁHA VÝZNAMNOSTI q
K1	K1	K1	K1	K1	2,5	3	1,571
K2	K3	K4	K5	K6			
	K2	K2	K2	K2	0,5	5	1,000
	K3	K4	K5	K6			
		K3	K3	K3	3,5	2	1,857
		K4	K5	K6			
			K4	K4	2,5	3	1,571
			K5	K6			
				K5	2,0	4	1,429
				K6	4	1	2,000

5.1.2 Výsledky hodnotové analýzy

V jednotlivých tabulkách uvádím výsledky hodnotové analýzy. Varianta s nejmenším počtem celkového součtu vážených indexů l_{ij}^* je nejlépe hodnocenou variantou hodnotové analýzy, která je nejvhodnější pro použití na mobilním robotu Hercules.

Tab. 5.1-6 Výsledek hodnocení varianty řemenového převodu

VARIANTA A (ŘEMENOVÝ PŘEVOD)				
KRITÉRIUM	HODNOTA	VÁHA VÝZNAMNOSTI KRITÉRIA q	INDEX ZMĚNY l_{ij}	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIÍ l_{ij}^*
K1	2	1,571	2	3,143
K2	2	1,000	4	4
K3	2	1,587	2	3,714
K4	2	1,571	2	3,143
K5	2	1,429	2	8,857
K6	1	2,000	1	2,000
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ l_{ij}^* VARIANTY A				18,857

Tab. 5.1-7 Výsledek hodnocení varianty převodu ozubenými koly

VARIANTA B (PŘEVOD OZUBENÝMI KOLY)				
KRITÉRIUM	HODNOTA	VÁHA VÝZNAMNOSTI KRITÉRIA q	INDEX ZMĚNY l_{ij}	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIÍ l_{ij}^*
K1	4	1,571	4	6,286
K2	2	1,000	2	2
K3	3	1,587	2	3,714
K4	3	1,571	3	4,714
K5	3	1,429	3	4,28
K6	1	2,000	1	2,000
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ l_{ij}^* VARIANTY B				23,000

Tab. 5.1-8 Výsledek hodnocení varianty pohonu umístěného v kloubu OÚ efektoru

VARIANTA C (POHON UMÍSTĚNÝ V KLOUBU OÚ EFEKTORU)				
KRITÉRIUM	HODNOTA	VÁHA VÝZNAMNOSTI KRITÉRIA q	INDEX ZMĚNY l_{ij}	VÁŽENÝ INDEX KRITÉRIÍ l_{ij}^*
K1	1	1,571	1	1,5714
K2	4	1,000	2	2
K3	1	1,587	4	7,429
K4	3	1,571	1	1,571
K5	1	1,429	1	1,429
K6	6	2,000	6	12,000
CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ l_{ij}^* VARIANTY C				26,000

Tab. 5.1-9 Výsledkové pořadí variant

POŘADÍ	CELKOVÝ SOUČET VÁŽENÝCH INDEXŮ l_{ij}^*	VARIANTA
1	18,9	A
2	23,0	B
3	26,0	C

5.1.3 Závěr hodnotové analýzy

Hodnotovou analýzou prošly tři varianty řešení ramene MR Hrecules, které byly mezi sebou porovnávány. Nejprve jsem určil kritéria, podle nichž byly varianty hodnoceny. Jedná se o kritéria *konstrukce, vnější rozměry ramene, poloha těžiště, hmotnost, montáž a umístění pohonu*. Jednotlivým kritériím byly přiřazeny hodnoty od jedné do šesti, podle mého usouzení jak která varianta vyhovuje danému kritériu. Tyto kritéria jsem pomocí metody „*porovnávání v trojúhelníku páru*“ mezi sebou porovnal. Výsledkem bylo určení, které kritérium je nejvýznamnější pro návrh ramene mobilního robotu Hercules a naopak, které kritérium je důležité nejméně. Poté jsem u každé varianty sečetl vážený index kritérií, což je hodnota kritéria násobena váhou významnosti. Varianta s nejmenší hodnotou součtu váženého indexu je dle hodnotové analýzy z navržených variant optimální pro konstrukci ramene mobilního robotu Hercules. Touto variantou je ŘEMENOVÝ PŘEVOD (označená písmenem A).

Varianta, jež byla stanovena hodnotovou analýzou za optimální, je i z mého pohledu z navržených variant nejlépe vyhovující, a to z těchto důvodů:

- jednoduchý přenos rotačního pohybu pomocí ozubeného řemene na osově vzdálené řemenice (osově vzdálené z důvodu možnosti přispívání hmotnosti pohonu k vyvážení ramene);
- jednoduchá konstrukce celého ramene;
- pomocí napínání řemene je odstraněna vůle v převodu;
- tichý chod;
- bezúdržbový provoz;
- jednoduchá montáž sestavy.

Varianta B (převod ozubenými koly), kdy je přenos pohybu od pohonu realizován pomocí vloženého hřídele, by byla vhodná v případě, že by orientační ústrojí mělo dva a více stupňů volnosti.

Varianta C, kdy je pohon umístěn v kloubu OÚ efektoru, je nevhodná z důvodu rozložení hmot na rameni a přispívání pohonu ke zvýšení momentu setrvačnosti ramene.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VYBRANÉ VARIANTY

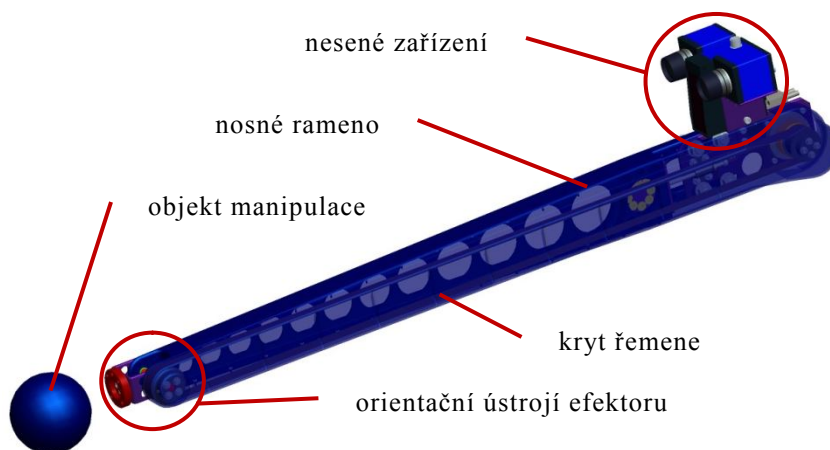
V této části diplomové práce se zaměřuji na konstrukční propracování vybrané varianty pro konstrukci posledního ramene manipulátoru mobilního robotu Hercules.

Úkolem je zabývat se snížením hmotnosti celkové sestavy, nadimenzovat vhodný pohon OÚ efektoru a docílit, aby těžiště ramene procházelo nebo se co nejvíce přiblížilo k ose rotace R3 dle obr. 1.1-1.

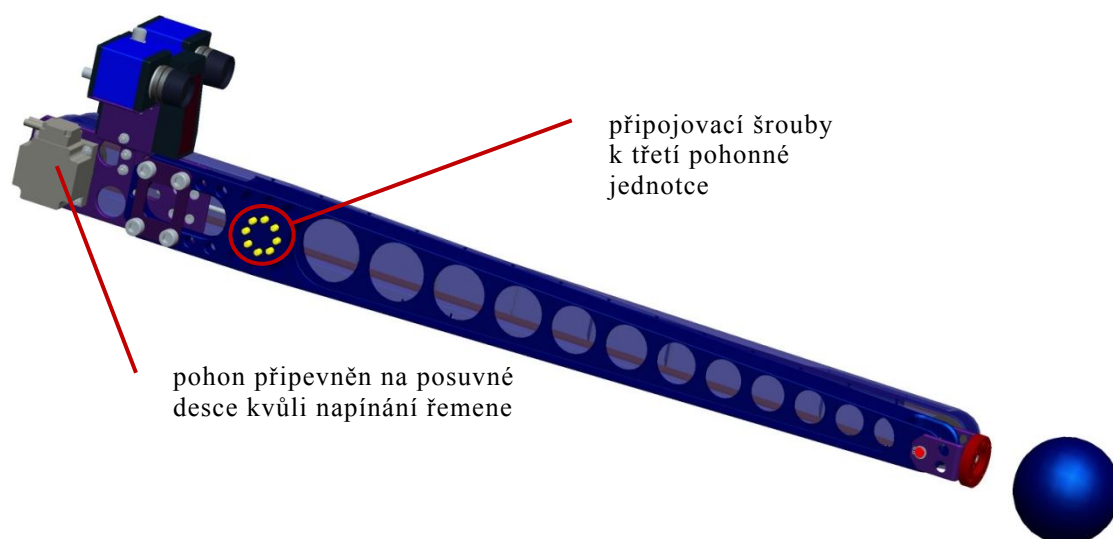
Dále provést pevnostní kontrolu hlavních konstrukčních uzlů a zkontrolovat únosnost pohonných jednotek manipulátoru MR Hercules.

6.1 Detailní popis vybrané varianty

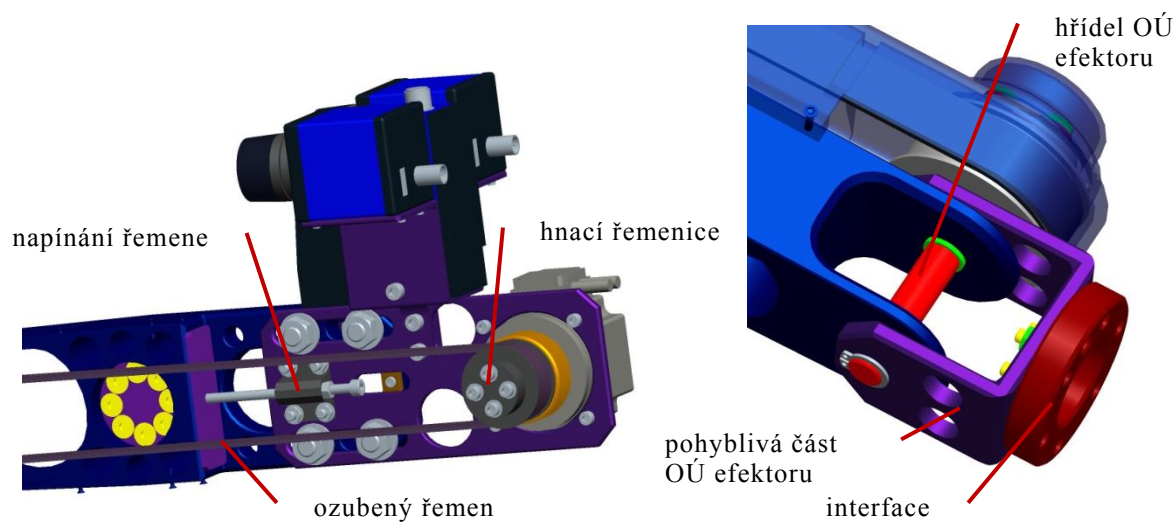
Na následujících obrázcích zobrazuji konstrukční řešení vybrané varianty. OÚ efektoru je spojeno s hřídelí uloženou v ložiskách a vsazenou do ramene robotu. Řemenice je pevně spojena s pohyblivou částí OÚ a ozubený řemen přenáší krouticí moment od pohonu na osově vzdálené řemenice. Pohon je uložený na ploché desce, se kterou je možné posouvat, a to z důvodu jednoduchého způsobu napínání řemene. Řemen je z bezpečnostních a provozních důvodů opatřen krytem. Nesené zařízení je v poloze, kdy svou hmotností přispívá k vyvážení ramene, tzn. že ovlivňuje polohu těžiště ramene, ovšem OM se při pohybu OÚ efektoru bude nacházet mimo zorný úhel kamer, které jsou z tohoto důvodu dle možností umístěny co nejvýše.



Obr. 6.1-1 Konstrukční řešení posledního článku mobilního robotu Hercules

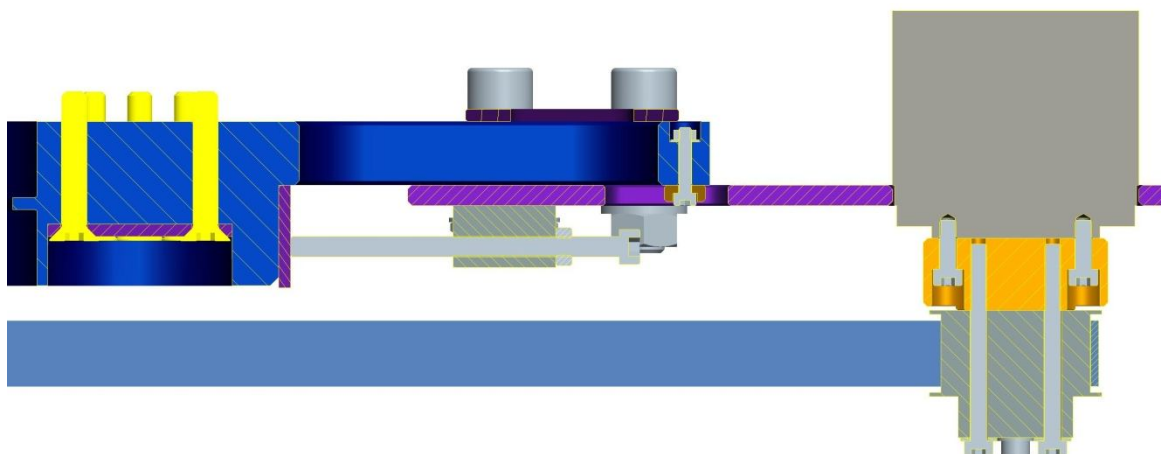


Obr. 6.1-2 Konstrukční řešení ramene

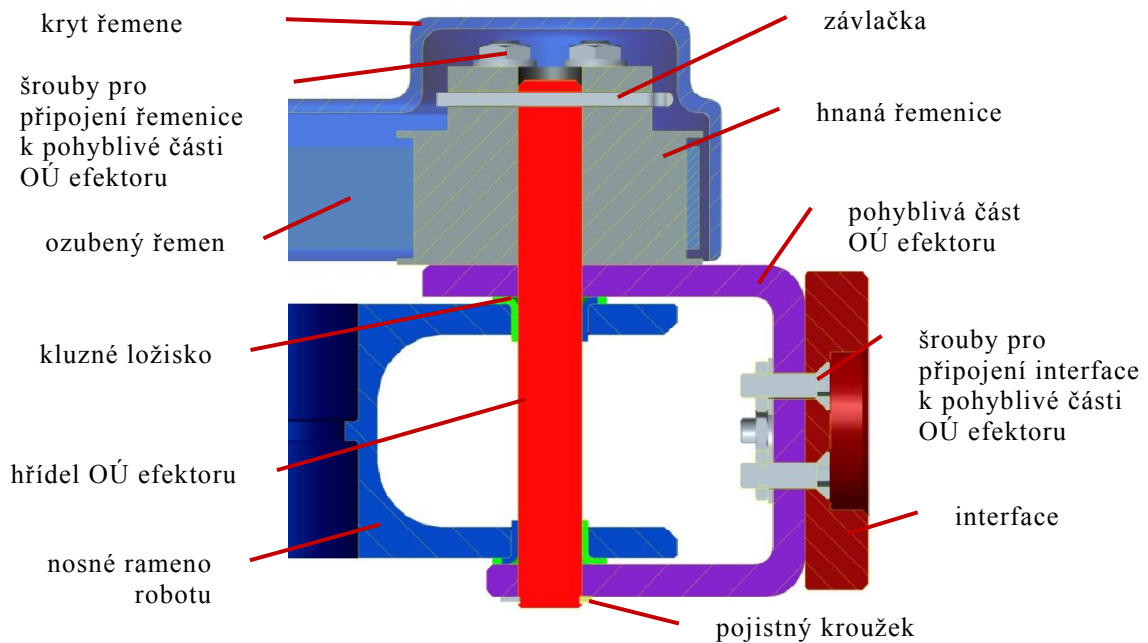


Obr. 6.1-3 Detail umístění pohonu

Obr. 6.1-4 Detail orientačního ústrojí



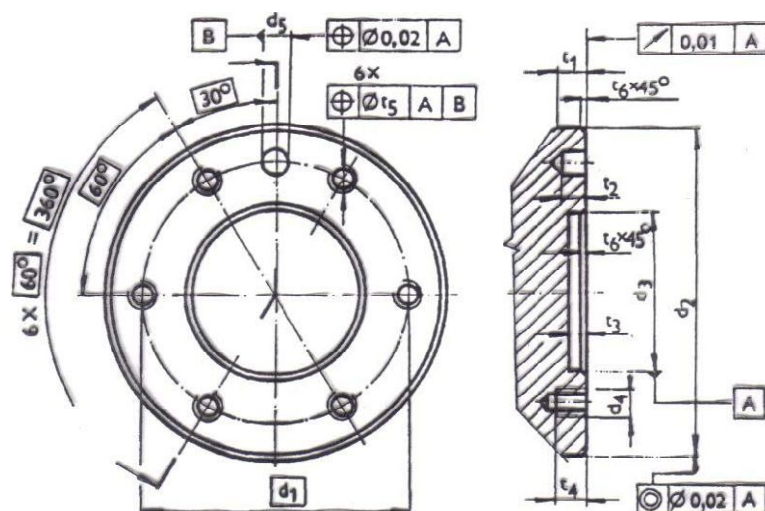
Obr. 6.1-5 Řez pohonnou jednotkou



Obr. 6.1-6 Řez pohyblivé části OÚ efektoru

6.2 Orientační ústrojí efektoru

Při tvorbě konstrukce posledního ramene postupují od konce, tzn. od OÚ efektoru. Efektor se připojuje k ramenu robotu pomocí normalizované přírubby tzv. interface. Velikost interface volím 40 ISO 94091, viz obr. níže.

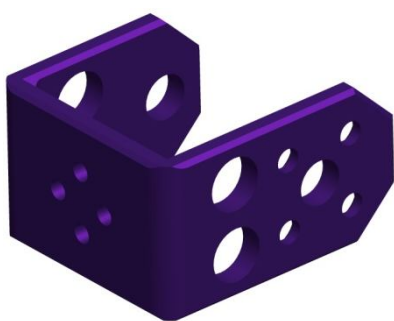
Obr. 6.2-1 Interface dle ISO 94091²⁴

²⁴ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

V tabulce tab. 6.2-1 jsou vypsány rozměry normalizované příruby. Interface pevně spojuje pomocí čtyř šroubů o velikosti M4 k pohyblivé části OÚ efektoru. Kvůli snížení hmotnosti volím materiál interface polykarbonát, který má dostatečnou pevnost (viz kapitola kontrola hlavních uzlů).

Tab. 6.2-1 Normalizované rozměry interface²⁵

Roztečný průměr d_1	d_2 h8	d_3 H7	d_4	d_5 H7	t_1 min.	t_2 min.	t_3 min.	t_4	t_3	t_6	počet otvorů
40	50	25	M6	6	6	6	6	i)	0,1	1	4
i) Pozn: Minimální hloubka závitových otvorů t_4 je závislá na materiálu spojovacích přírub efektoru průmyslového robotu. Rozměry jsou uvedeny v mm.											



Obr. 6.2-2 Pohyblivá část OÚ efektoru
 efektoru se otáčí kolem osy rotace o $\pm 90^\circ$. Materiál pohyblivé části OÚ efektoru volím hliník.

Pohyblivá část OÚ efektoru (obr. 6.2-2) je k rameni robotu připojena pomocí hřídele, která je uložena v kluzných ložiscích. Rozhodoval jsem se mezi použitím kluzných a valivých ložisek. Nakonec jsem si vybral ložiska kluzná, kdy rozhodujícím faktorem je

snížení hmotnosti. Pohyblivá část OÚ



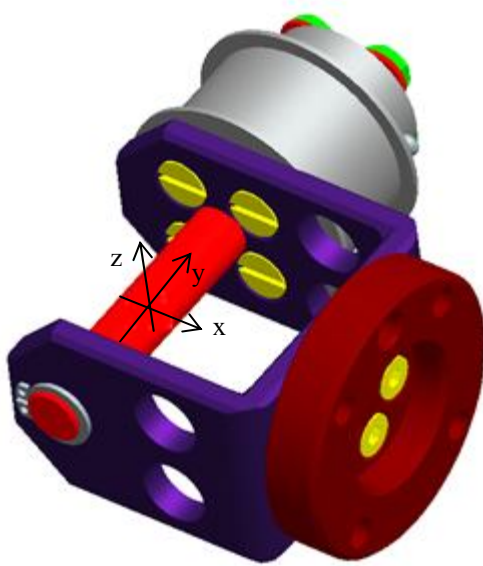
Obr. 6.2-3 Hřídel OÚ efektoru

zafixována pojistným kroužkem, a z druhé strany závlačkou přes ozubené kolo. Tím se docílí, aby se hřídel otáčela spolu s ozubenou řemenicí. Materiál hřídele volím konstrukční ocel.

Hřídel OÚ efektoru (obr. 6.2-3) má průměr 10 mm a je vsazena do ramene robotu přes již zmiňovaná kluzná ložiska. Na jedné straně je hřídel

²⁵ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

6.2.1 Parametry orientačního ústrojí efektoru



Obr. 6.2-4 Parametry OÚ efektoru

Ze softwaru Pro/Engineer jsem získal fyzikální hodnoty potřebné pro výpočty hlavních uzlů konstrukčního celku. Zobrazené parametry jsou s OM a bez něj. V tomto návrhu je použita řemenice s nejmenším počtem zubů, která se standardně vyrábí pro ozubené řemeny profilu AT.

```
VOLUME = 5.9438441e+05 MM^3
SURFACE AREA = 6.9751845e+04 MM^2
AVERAGE DENSITY = 8.8030553e-09 TONNE / MM^3
MASS = 5.2323988e-03 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to SS_OU coordinate frame:
X Y Z 1.3425021e+02 8.7931883e-01 -8.2528284e-04 MM

INERTIA with respect to SS_OU coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 5.2500489e+00 1.3138483e-03 2.1360294e-04
Iyx Iyy Iyz 1.3138483e-03 1.0312109e+02 0.0000000e+00
Izx Izy Izz 2.1360294e-04 0.0000000e+00 1.0333640e+02
```

Obr. 6.2-5 Parametry OÚ efektoru s OM

```
VOLUME = 7.0785630e+04 MM^3
SURFACE AREA = 3.8335919e+04 MM^2
AVERAGE DENSITY = 3.2831352e-09 TONNE / MM^3
MASS = 2.3239880e-04 TONNE

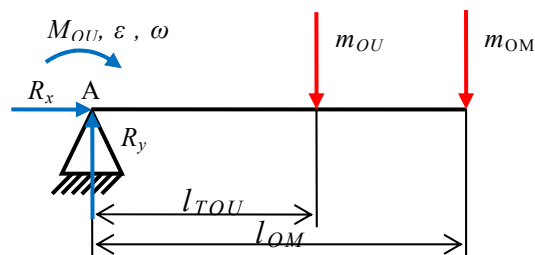
CENTER OF GRAVITY with respect to SS_OU coordinate frame:
X Y Z 1.0544981e+01 1.9797636e+01 -1.8581030e-02 MM

INERTIA with respect to SS_OU coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 2.5004892e-01 1.3138483e-03 2.1360294e-04
Iyx Iyy Iyz 1.3138483e-03 1.2109076e-01 3.4712112e-06
Izx Izy Izz 2.1360294e-04 3.4712112e-06 3.3640399e-01
```

Obr. 6.2-6 Parametry OÚ efektoru bez OM

6.2.2 Silový rozbor orientačního ústrojí efektoru



Obr. 6.2-7 Silový rozbor OÚ efektoru

Tab. 6.2-1 Tabulka známých hodnot

$m_{OU} = 0,232 \text{ kg}$	hmotnost OÚ efektoru
$m_{OM} = 5 \text{ kg}$	hmotnost objektu manipulace
$l_{TOU} = 10,54 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště OÚ
$l_{OM} = 190 \text{ mm}$	vzdálenost objektu manipulace
$r_{TOU} = 134,25 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště OÚ efektoru (s OM)
$a = 3 \text{ ms}^{-2}$	zrychlení OÚ efektoru (volím)
$\omega = 0,785 \text{ rads}^{-1}$	úhlová rychlost OÚ efektoru
$I_{OU} = 0,103121 \text{ kgm}^2$	moment setrvačnosti OÚ efektoru (s OM)

Reakce v bodě A

$$R_x = 0 \text{ N} \quad (3)$$

$$R_y = m_{OU} \cdot g + m_{OM} \cdot g = 0,232 \cdot 9,81 + 5 \cdot 9,81 = 51,72 \text{ N} \quad (4)$$

Otáčky OÚ efektoru

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \Rightarrow n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} \quad (5)$$

$$n_{OU} = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot 0,785}{2\pi} = 7,5 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad (6)$$

Statický moment k bodu A

$$\begin{aligned} M_{SA} &= m_{OU} \cdot l_{TOU} \cdot g + m_{OM} \cdot l_{OM} \cdot g = \\ &= 0,232 \cdot 0,01054 \cdot 9,81 + 5 \cdot 0,140 \cdot 9,81 = 6,9 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (7)$$

g ... gravitační zrychlení [ms^{-2}]

Dynamický moment k bodu A

$$\varepsilon = \frac{a}{r_{TOU}} = \frac{3}{0,13425} = 22,346 \text{ rads}^{-2} \text{ úhlové zrychlení} \quad (8)$$

$$M_{DA} = \varepsilon \cdot I_{OU} = 22,346 \cdot 0,103121 = 2,3 \text{ Nm} \quad (9)$$

Celkový moment působící od OÚ na pohon

$$M'_{OU} = M_{SA} + M_{DA} = 6,9 + 2,3 = 9,2 \text{ Nm} \quad (10)$$

$$M_{OU} = M'_{OU} \cdot k_D = 9,2 \cdot 1,2 = 11,04 \text{ Nm} \quad (11)$$

k_d ... koeficient bezpečnosti

6.3 Návrh pohonu orientačního ústrojí efektoru

Rotační pohyb vyvozuje motor přeměnou elektrické energie v mechanickou. Elektrické motory mají vysoké otáčky a je potřeba je redukovat, což je provedeno pomocí převodovky. Pojmem pohonné jednotky je pak myšleno spojení motoru s transformací jeho rychlosti, tedy s převodovkou a řídicí jednotkou motoru jako komplet.

Mobilní robot Hercules si nese zdroj elektrické energie sám, a to v podobě dvou olověných akumulátorů, které se používají u automobilů. Výstupní napájecí napětí je dle požadavkového listu 24 V stejnosměrného napětí (z angličtiny DC). Tudíž se zabývám elektromotory, které jsou napájeny tímto napětím.

Je požadavkem, aby redukce otáček byla provedena pomocí harmonické, cyklo popřípadě planetové převodovky. Harmonická nebo cyklo převodovka jsou nejčastěji používané převodovky v robotice a mají mnoho výhod²⁶:

- ⇒ velké převodové poměry
- ⇒ vysoká tuhost

²⁶ SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory : učební text*. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.

- ⇒ vysoká přesnost
- ⇒ nízké momenty setrvačnosti
- ⇒ malé rozměry i hmotnost
- ⇒ dlouhá životnost
- ⇒ vysoká účinnost
- ⇒ velká přetížitelnost

Kompletní dodávané pohonné jednotky mají řadu výhodných vlastností:

- ⇒ celek je dodáváný jako kompletní řešení rotačního pohybu
- ⇒ výrobce udává parametry na výstupu z převodovky
- ⇒ cenově výhodnější
- ⇒ jistota v provozu (pohony jsou výrobcem odzkoušené jako celek)
- ⇒ minimální rozměry pohonné jednotky

Pohony Harmonic Drive LLC

Firma Harmonic Drive LLC je americkou firmou, která se zabývá výrobou harmonických převodovek a dodává kompletní řešení pohonných jednotek. Používá dva typy motorů, a to stejnosměrné DC servo pohony a střídavé AC servo pohony s kombinací harmonických převodovek. Výrobce uvádí, že jejich pohony mají nulový odpor, vysokou přesnost, vysokou tuhost, rychlou odezvu a kompatibilitu. Pohonné jednotky se taktéž mohou použít jako ložiskové domky. Katalog výrobků obsahuje širokou škálu produktů.

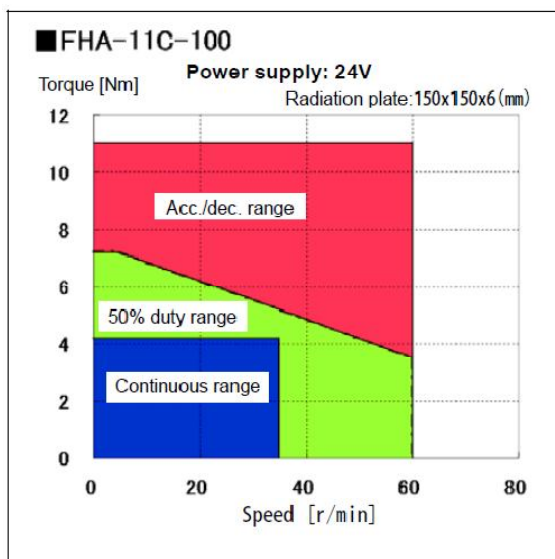
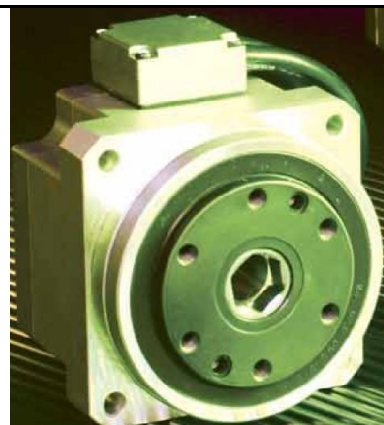
Řídící jednotky AC servo pohonů jsou napájeny stejnosměrným proudem, které jej přeměňují na střídavé napájecí napětí motoru. Tudíž je možné použít tyto pohony u mobilních robotů, jež mají ve většině případů jako zdroj energie baterii. Jedná se tedy o synchronní, bezkártačové motory, které se navenek chovají jako stejnosměrné motory, ale uvnitř mají třífázové vinutí. Rotor je tvořen permanentními magnety a na statoru je třífázové vinutí.

6.3.1 Typ pohonu Harmonic Drive LLC

Z nabídky pohonů firmy Harmonic Drive LLC vybírám z řady FHA. Pro přenášený krouticí moment (M_{OU}) je vhodný pohon FHA-11C za předpokladu, že použiji vhodný převodový poměr mezi řemenicemi. Pohon je spojený s harmonickou převodovkou o převodovém poměru $i_p = 100$ s přípustným krouticím momentem 11 Nm, jehož parametry jsou v následující tabulce.

Tab. 6.3-1 Parametry pohonu Harmonic Drive²⁷

model	FHA-11C-100
převodový poměr	100
max. krouticí moment	11 Nm
max. otáčky	60 min ⁻¹
poměr: moment / el. proud	2,6 Nm/A
max. proud	5,6 A
stálý krouticí moment	4,2 Nm
stálé otáčky	35 min ⁻¹
stálý proud	2,8 A
napájecí napětí	24 V
moment setrvačnosti	0,067 kgm ²
dovolený krouticí moment	40 Nm
tuhost	4x10 ⁴ Nm/rad
počet pólů	5
hmotnost	0,62 kg



Obr. 6.3-1 Momentová charakteristika pohonu

Na obr. 6.3-1 je zobrazena momentová charakteristika pohonu FHA-11C-100.

Pro nepřetržitý provoz se pohon musí pohybovat v poli „Continuous range“, tj. pro zatížení do 4 Nm a při otáčkách 35 min⁻¹. „50% duty range“ znamená, že při zatížení točivým momentem do 7 Nm a při otáčkách vyplývajících z grafu se pohon může pohybovat 50% času

z doby cyklu. „Acc/decc. range“ je maximální hodnota zatížení pohonu při zrychlení nebo zpomalení. Jde o krátkodobé zatížení, kdy při rozběhu nebo brzdění vznikají setrvačné účinky.

²⁷ Harmonic Drive LLC. *Actuators* [online]. 2006 [cit. 2010-05-11]. FHA-C Mini Series. Dostupné z WWW: <<http://www.harmonicdrive.net/products/actuators/fha-c-mini/>>.

6.4 Ozubený řemen a řemenice

Ozubení řemen a řemenice vybírám od firmy TYMA CZ, s.r.o., která je dodavatelem pro český trh. Profil řemene používám AT, jež se používá při nastavování přesné polohy, jak uvádí katalog firmy TYMA CZ, s.r.o. Dále jen cituji: „Řemeny jsou vyrobeny z polyuretanu s vysokou chemickou odolností. Tažné vlákno je ocelové (v případě zvláštního požadavku kevlarové) ve tvaru šroubovice navinuté po celé šíře řemenu. Řemeny mají světlou, mléčnou nebo bílou barvu. Používají se jako řemeny hnací nebo transportní. Teplotní odolnost od -30°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Základem řemenů je normalizovaný lichoběžníkový profil zubu dle DIN7721. Řemeny se vyrábějí v základních typech T. V případě, že je požadována větší přesnost pohonu nebo vyšší zatížení, se používají řemeny s profilem AT. Řemeny se vyrábějí i v oboustranném provedení – DL.“²⁸ Řemenice tohoto profilu se standardně vyrábějí ze slitiny hliníku.

Řemen dimenzuji podle postupu výpočtu, který uvádí výrobce.²⁹

Tab. 6.4-1 Vstupní hodnoty pro výpočet ozubeného řemene

$M_{kM} = 11 \text{ Nm}$	max. krouticí moment motoru
$t = 10 \text{ mm}$	rozteč řemene
$l_a = 850 \text{ mm}$	osová vzdálenost (počáteční z Pro/Engineer)
$z_1 = 12$	počet zubů řemenice hnací (spojena s pohonem)
$z_2 = 14$	počet zubů řemenice hnané (spojena s OÚ efektoru)
$d_{01} = 36,35 \text{ mm}$	roztečný průměr řemenice hnací
$d_{02} = 42,70 \text{ mm}$	roztečný průměr řemenice hnané

Redukovaný převodový poměr mezi řemenicemi

$$i_R = \frac{z_1}{z_2} = \frac{12}{14} = 0,857 \quad (12)$$

Přepočet krouticího momentu působícího od OÚ efektoru na pohon

$$M_{OU \rightarrow P} = M_{OU} \cdot i_R = 11,04 \cdot 0,857 = 9,46 \text{ N} \quad (13)$$

²⁸ Tyma.cz : Ozubené řemeny - základní informace [online]. 2003 [cit. 2010-04-18]. Ozubené řemeny polyuretanové. Dostupné z WWW: <http://www.tyma.cz/files/katalogy/tyma_r2003.pdf>.

²⁹ Mulco.cz : Technische Daten ATP10 [online]. 2010 [cit. 2010-04-18]. Gesamtkatalog. Dostupné z WWW: <<http://mulco.gwj.de/de/index.htm>>.

Otáčky a úhlová rychlost pohonu

$$n_p = \frac{n}{i_R} = \frac{7,5}{0,857} = 8,75 \text{ min}^{-1} \quad (14)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi n_p}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,75}{60} = 0,916 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15)$$

Počet zubů v záběru

$$z_e = \frac{z_1}{\pi} \arccos \left[\frac{t(z_2 - z_1)}{2 \cdot \pi \cdot l_a} \right] = \frac{12}{\pi} \arccos \left[\frac{10(14 - 12)}{2 \cdot \pi \cdot 850} \right] = 5,986 \quad (16)$$

Šířka řemene stanovena z max. krouticího momentu pohonu

$$b = \frac{M_{kM}}{z_1 z_e M_{spez}} = \frac{11}{12 \cdot 5,986 \cdot 15,199} = 10,052 \text{ mm} \quad (17)$$

$$M_{spez} = 15,199 \text{ Ncm} \cdot \text{cm}^{-1} \text{ katalogová hodnota}$$

Vybírám řemen šířky 16 mm, což je nejbližší vyšší hodnota standardně vyráběného řemene.

Napínací síla

$$F_U = \frac{2M_{kM}}{d_0} = \frac{2 \cdot 11}{36,35} = 605,227 \text{ N} \quad (18)$$

Max. napínací síla pro tento typ řemene je dle katalogu 2000 N.

$$F_{U_{\text{zel}}} = 2000 \text{ N} \leq F_U = 605 \text{ N} \text{ podmínka splněna} \quad (19)$$

Teoretická délka řemene

$$L_t = 2l_a + z_1 t = 2 \cdot 850 + 12 \cdot 10 = 1820 \text{ mm} \quad (20)$$

Skutečná délka řemene dle katalogu

$$L_{sk} = 1860 \text{ mm}$$

Skutečná osová vzdálenost řemenic

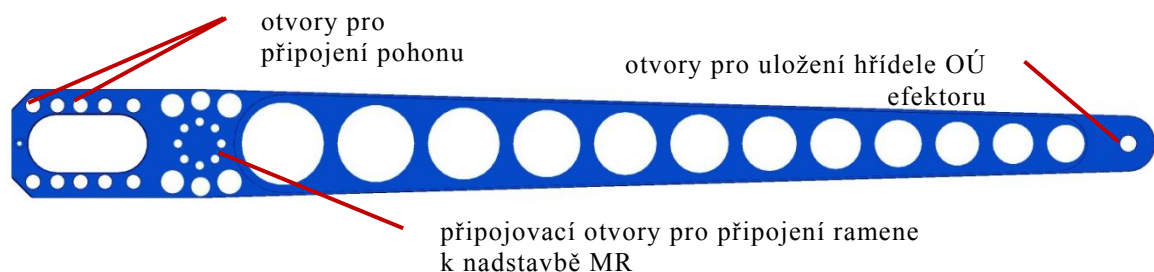
$$l_{os} = \frac{L_{sk}}{2} - 2 \cdot d_0 = 897,3 \text{ mm} \quad (21)$$

Označení ozubeného řemene

AT10-16-1860

6.5 Profil nosného ramene

Na rameno MR je všeobecně brán velký zřetel, a to zvláště na rozložení hmot na rameni kvůli těžišti a celkové hmotnosti ramene, která by měla být co nejvíce minimalizována. Na rameno jsou připevněny veškeré komponenty (OÚ efektoru, pohon, nesené zařízení a další). Tvarem ramene se snažím dosáhnout co nejmenší vzdálenosti těžiště od osy rotace. Průhyb ramene je možné připustit větší, asi do hodnoty **1 mm** z důvodu, že je MR Hercules řízen dálkově operátorem, a proto není požadována opakovatelná přesnost polohování. Materiál nosného ramene volím slitinu hliníku. Polotovár pro výrobu ramene vybírám od firmy Ferona a.s. normalizovanou tyč hliníkovou, plochou, lisovanou, dle normy EN 755-5 o rozměru 80x40³⁰.



Obr. 6.5-1 Profil nosného ramene

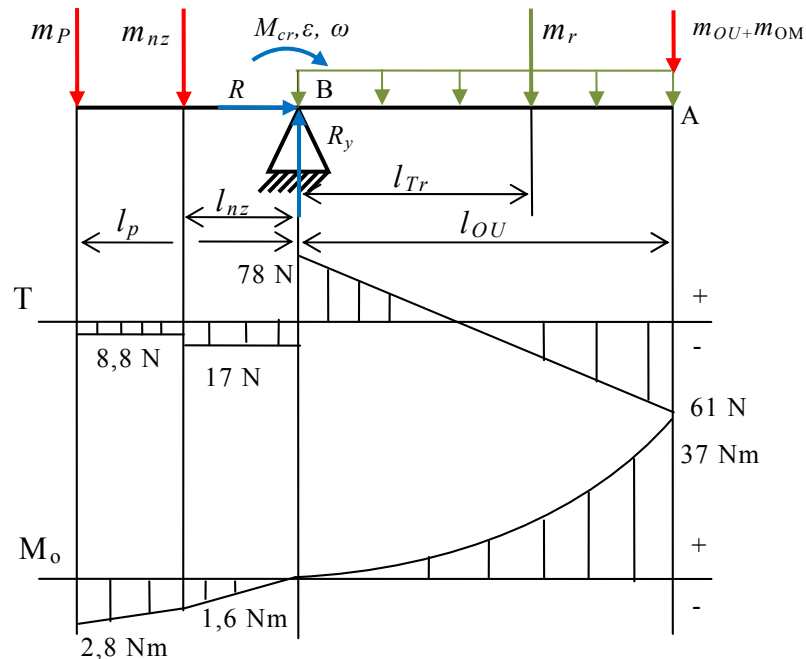


Obr. 6.5-2 Řez ramenem

³⁰ Ferona a.s. *Ferona : Specifikace výrobku* [online]. 2004 [cit. 2010-04-21]. Sortimentní katalog. Dostupné z WWW: <<http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=23851>>.

6.5.1 Silový rozbor nosného ramene

V silovém rozboru ramene zatěžují jen hlavními prvky, do kterých jsem zahrnul pohon, nesené zařízení, OÚ efektoru a OM. Celkovým rozbohem ramene 3 se zabývám v další kapitole.



Obr. 6.5-3 Silový rozbor nosného ramene

Tab. 6.5-1 Hodnoty pro silový rozbor nosného ramene

$m_P = 0,898 \text{ kg}$	hmotnost pohonu (včetně komponentů potřebných pro upevnění pohonu na ramenu)
$m_{nz} = 0,84 \text{ kg}$	hmotnost neseného zařízení
$m_r = 1,004 \text{ kg}$	hmotnost ramene
$l_{nz} = 141 \text{ mm}$	vzdálenost neseného zařízení od osy rotace ramene
$l_P = 186 \text{ mm}$	vzdálenost pohonu od osy rotace ramene
$l_{Tr} = 174 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště ramene
$l_{OU} = 684 \text{ mm}$	vzdálenost osy rotace OÚ od osy rotace ramene
M_{cr}	celkový moment ramene působící v bodě B
R_{xB}	reakce v ose x bodu B
R_{yB}	reakce v ose y bodu B
ω	úhlová rychlost
ε	úhlové zrychlení

Reakce v ose x bodu B (R_{xB})

$$R_{xB} = 0 \text{ N} \quad (22)$$

Reakce v ose y bodu B (R_{yB})

$$\begin{aligned} R_{yB} &= (m_{OU} + m_{OM} + m_{nz} + m_P + m_r) \cdot g = \\ &= (0,232 + 5 + 0,84 + 0,898 + 1,004) \cdot 9,81 = 78,22 \text{ N} \end{aligned} \quad (23)$$

Zatížení v bodě A

$$G_A = (m_{OU} + m_{OM}) \cdot g = (0,232 + 5) \cdot 9,81 = 51,32 \text{ N} \quad (24)$$

Momentové zatížení v bodě B

$$\begin{aligned} M_B &= [(m_{OU} + m_{OM}) \cdot l_{OU} + m_{r \cdot l_{Tr}} - m_{nz} \cdot l_{nz} - m_P \cdot l_P] \cdot g = \\ &= [(0,232 + 5) \cdot 0,684 + 1,004 \cdot 0,174 - 0,84 \cdot 0,141 - 0,898 \cdot 0,186] \cdot 9,81 = \\ &= 34,04 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (25)$$

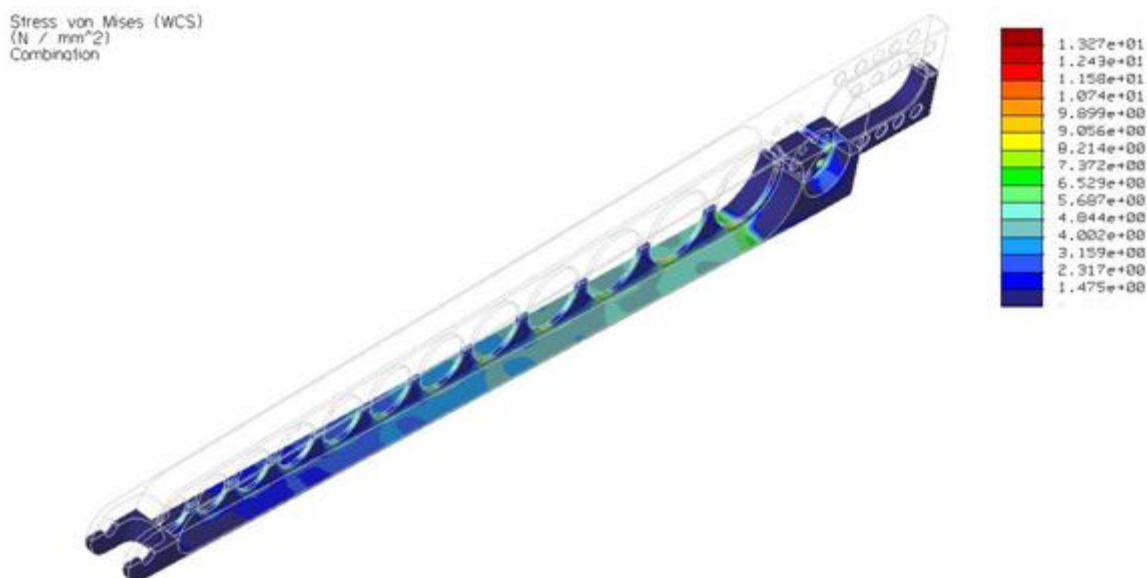
6.5.2 Pevnostní analýza nosného ramene

Software Pro/Engineer obsahuje modul Pro/MECHANICA Structure, který využívá moderní trendy ve výpočtech namáhaných strojních součástí.

Rameno podrobuji statické analýze, z níž jsou pro mě důležité dvě hodnoty, a to maximální napětí a průhyb ramene. Síly působící na rameno jsou uvedeny v předcházející kapitole. Tyto síly jsem ještě vynásobil o koeficient bezpečnosti k (volím 1,2).

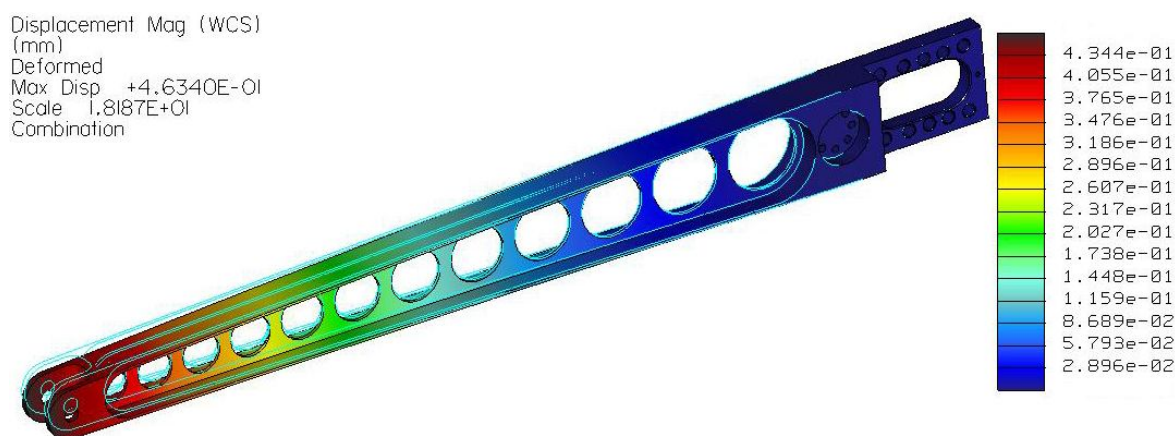
Na prvním obrázku (obr. 6.5-4) je zobrazena již zmiňovaná statická analýza napětí [MPa]. Nejvyšší hodnota napětí byla stanovena na 14,74 MPa, a to v oblasti otvorů pro připevnění ramene k nadstavbě, kde působí šroub, který napíná ozubený řemen. Největší napětí ramene je v prvním otvoru odlehčení (myšleno od osy rotace), kde je tloušťka stěny 3 mm a hodnota napětí je 9,51 MPa. Dle katalogu firmy Ferona a.s. se používá materiál EN AW-2017A T4, který má pevnost v tahu $R_m = 400 \text{ MPa}$. Dovolené napětí slitiny hliníku pro míjivé zatížení v ohybu se pohybuje v rozmezí $50 \div 70 \text{ MPa}$ ³¹.

³¹ Ferona a.s. *Ferona : Specifikace výrobku* [online]. 2004 [cit. 2010-04-21]. Sortimentní katalog. Dostupné z WWW: <<http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=23851>>.



Obr. 6.5-4 Statická analýza - NAPĚTÍ

Na obr. 6.5-5 je zobrazen maximální průhyb ramene v měřítku 18,187:1 mm, který je 0,4634 mm. Jako dovolený průhyb jsem stanovil hodnotu do 1 mm, čímž je podmínka splněna.



Obr. 6.5-5 Statická analýza - PRŮHYB

6.6 Krytování řemene

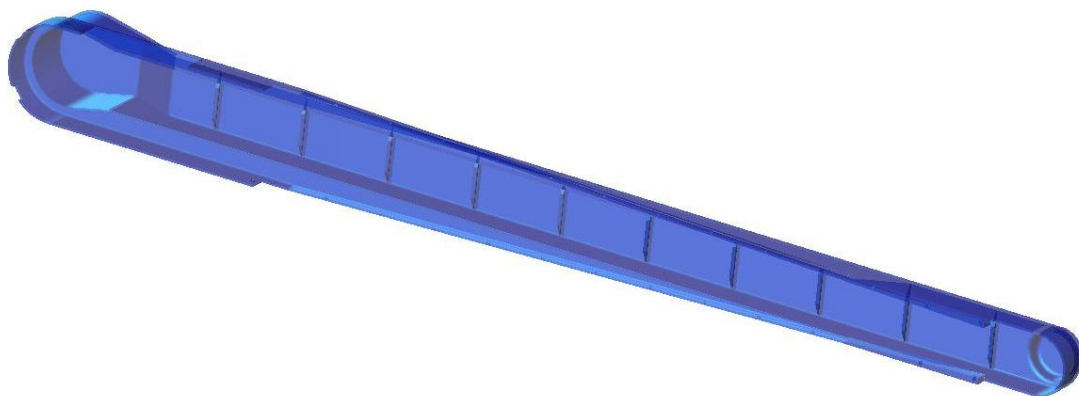
Řemen je nutné z bezpečnostních i provozních podmínek opatřit krytem. Vlastností krytu je chránit obsluhu MR před úrazem z rotujících částí a zabránit vniku nečistot mezi řemen a řemenice. Tvar krytu je z hlediska výroby dosti složitý a je počítáno s tím, že jeho výroba bude provedena pomocí technologie Rapid Prototyping („3D tisk“). Na katedře robototechniky je možnost využití této technologie³². Výrobním materiálem

³² Katedra robototechniky [online]. 2010 [cit. 2010-04-22]. Rapid Prototyping. Dostupné z WWW: <<http://robot.vsb.cz/rapid-prototyping/>>

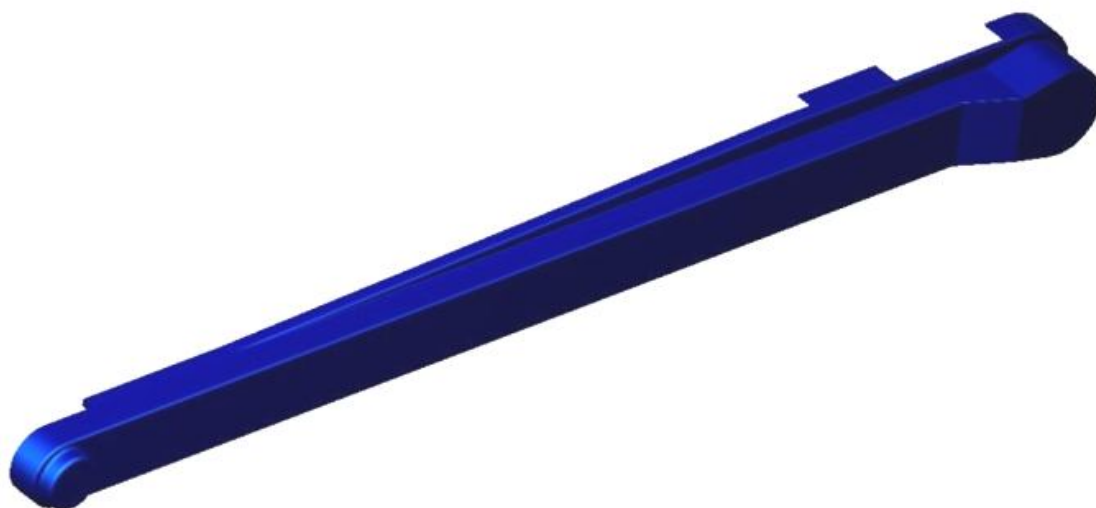
je použitý polykarbonát (PC). Pracovní prostor „3D tiskárny“ Rapid Prototyping je: Š x H x V: 406 x 356 x 406 mm.

Pro velikost pracovního prostoru je kryt rozdělen na tři části o velikosti 300 mm a před smontováním je možné kryt slepit do jednoho celku pomocí lepidla určeného pro materiál polykarbonát.

Tloušťka stěny krytu je 2 mm a pro zpevnění jsem opatřil stěny žebrováním. Kryt je pevně spojen s rámem a pohon je zakrytován tak, aby s ním bylo možné posouvat v ose napínání řemene.



Obr. 6.6-1 Kryt řemene - pohled dovnitř



Obr. 6.6-2 Kryt řemene - pohled zvenku

7 KONTROLA HLAVNÍCH KONSTRUKČNÍCH UZLŮ

Pro bezpečný provoz posledního článku MR Hercules je nutné provést kontrolu hlavních konstrukčních uzlů, které přenášejí výkon a jsou nějakým způsobem namáhány. Při kontrole se snažím postupovat systematicky, a to od konce navrženého ramene, tedy od interface. Namáhané komponenty zatěžuji v nejnepríznivější poloze kdy je namáhání největší. V tabulce uvádím přehled komponentů a druh použitého materiálu. V předchozí kapitole jsem provedl potřebné výpočty pro návrh posledního ramene MR Hercules. Toto nosné rameno jsem již pevnostně zkontroloval, a proto jej v této kapitole nebudu uvádět.

Tab. 6.6-1 Tabulka materiálu a hmotnosti použitých komponentů

KOMPONENT	MATERIÁL	HMOTNOST
interface	polykarbonát	17,3 g
pohyblivá část OÚ efektoru	hliník	56,1 g
hřídel OÚ efektoru	ocel	50,4 g
nosné rameno	hliník	1,004 kg
distanční příruba pohonu	hliník	55,7 g
pohon	~	620 g
nesené zařízení (kamery a laser)	~	840 g
napínací šroub	ocel	14,2 g
matice napínacího šroubu	ocel	40,2 g
deska pohonu	ocel	342 g
upínka (profil) neseného zařízení	polykarbonát	48 g
kryt řemene	polykarbonát	362 g
řemenice hnací	hliník	76 g
řemenice hnaná	hliník	104 g
řemen	polyuretan	(50 g)

7.1.1 Interface

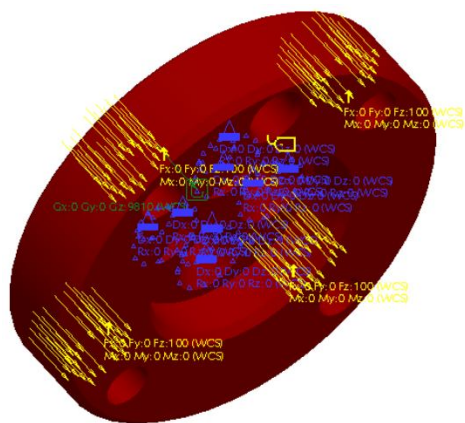
Interface zatěžuji silou působící od OM na otvory pro připojení efektoru robotu

$$F = m_{OM} \cdot g = 5 \cdot 9,81 = 49,5 \approx 50 \text{ N} \quad (26)$$

a kritickou silou, kterou vyvozují dynamické účinky při možné kolizi

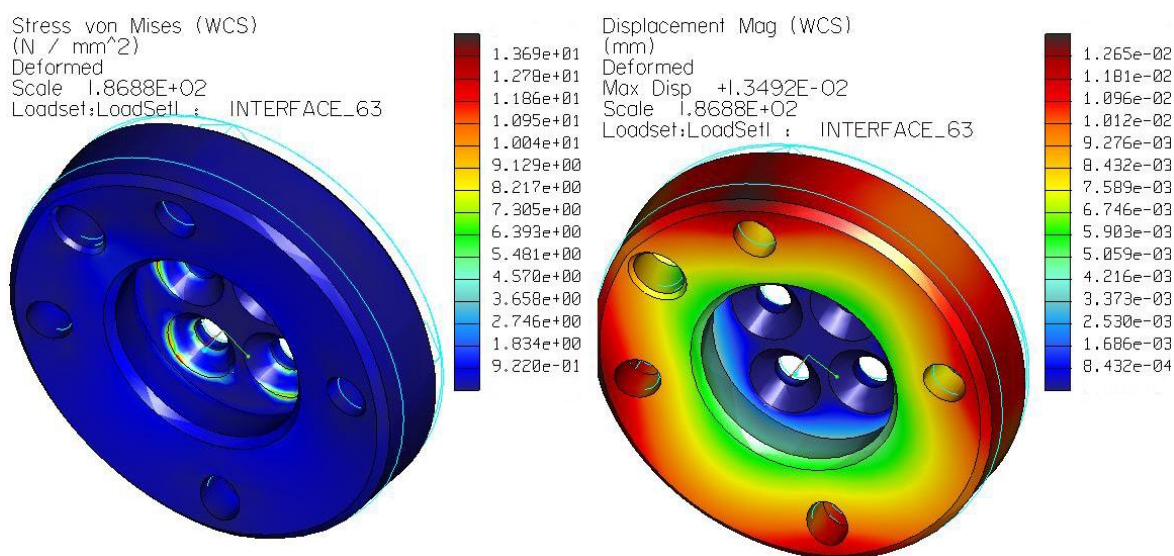
$$F_{krit} = m_{OM} \cdot a_{krit} = 5 \cdot 10 = 50 \text{ N}, \quad (27)$$

kde a_{krit} je kritické zrychlení, kdy hodnota je volena na 10 ms^{-2} .



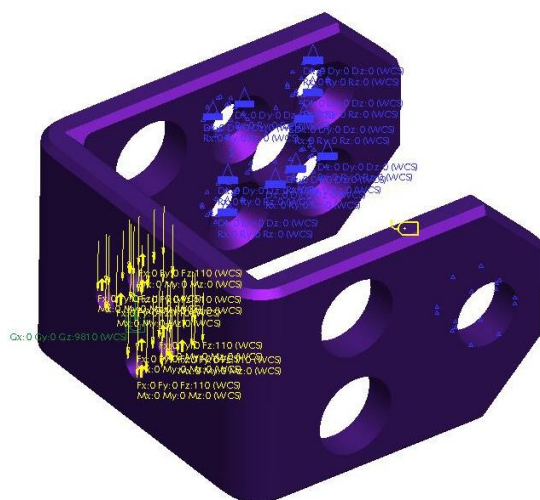
Obr. 6.6-1 Způsob uložení a zatížení interface

Výrobu interface doporučuji pomocí již zmiňované technologie Rapid Prototyping. Maximální napětí je 14,6 MPa v oblasti otvorů pro uchycení efektoru. Průhyb interface je 0,015 mm. Měřítko zobrazení zatížení je 186,88:1 mm. Pevnost v tahu materiálu polykarbonátu (PC) je 68 MPa, což je dostačující.



Obr. 6.6-2 Výsledky namáhání interface pro připojení efektoru

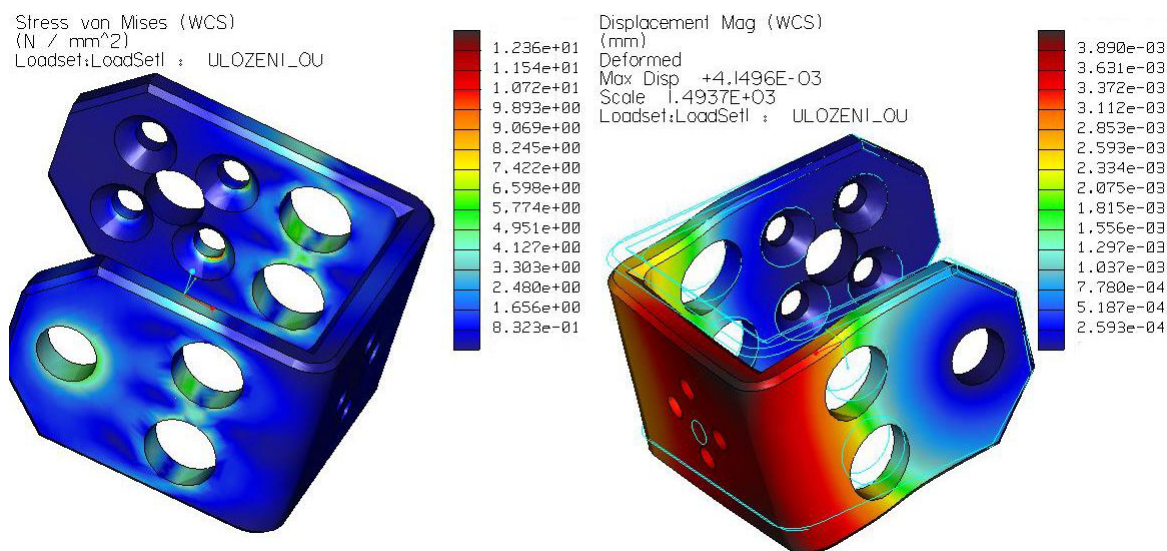
7.1.2 Kontrola pevnosti pohyblivé části OÚ



Obr. 6.6-3 Způsob uložení a zavedení sil

Pohyblivá část OÚ je zatížena OM a silou vyvozenou pohonem, které přenášejí šrouby spojující hnanou řemenici. Silový rozbor je popsán v kapitole návrhu OÚ efektoru (kapitola 6). Byla přidána kritická síla F_{krit} (27) z dynamického účinku vyvolaného OM, který může vzniknout při kolizi MR.

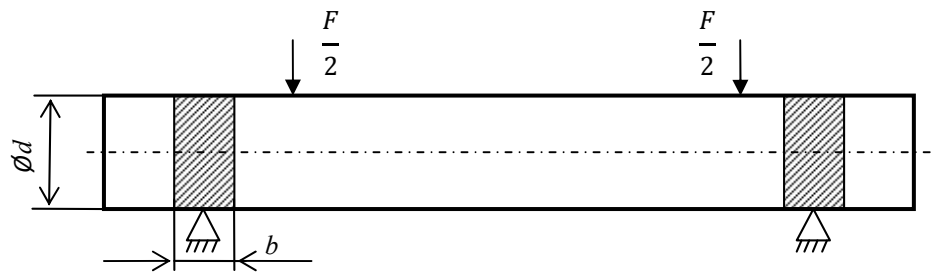
Největší napětí je v oblasti otvorů pro uložení hřídele. Maximální hodnota napětí je 13,19 MPa a průhyb pohybující se OÚ efektoru je $4,15 \cdot 10^{-3}$ mm.



Obr. 6.6-4 Výsledky namáhání pohyblivé části interface

7.1.3 Hřídel OÚ efektoru

Hřídel OÚ efektoru je namáhán na smyk a na otláčení od pohyblivé části efektoru, kde je nejmenší plocha. Otláčení je zkontrolováno ve výpočtu pohyblivé části OÚ efektoru, která je vyrobena z měkčího materiálu. Pevnostním výpočtem kontroluji dovolené napětí ve stíhu.



Tab. 6.6-2 Vstupní parametry výpočtu hřídele

$b_{OU} = 5 \text{ mm}$	tloušťka stěny pohyblivé části OÚ efektoru
$\varnothing d_h = 10 \text{ mm}$	průměr hřídele
$\tau_{Ds} = 40 \text{ MPa}$	dovolené napětí ve střihu pro konstrukční ocel hřídele
A	plocha průřezu hřídele
F_t	tíhová síla vyvolaná hmotností OM a OÚ efektoru

$$\tau_{Ds} \geq \frac{F_t}{A} \text{ pevnostní podmínka} \quad (28)$$

$$F_t = (m_{OM} + m_{OU})g = (5 + 0,232)9,81 = 51,33 \text{ N} \quad (29)$$

$$A = d_h \cdot b_{OU} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ mm} \quad (30)$$

$$40 \text{ MPa} \geq \frac{51,33}{50} = 1,0266 \text{ MPa} \text{ vyhovuje}$$

7.1.4 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska navrhují na dobu jejich životnosti podle výpočtového programu na stránkách www.igus.cz. Kluzná ložiska se pohybují v suchém prostředí. Je potřeba použít materiál s nízkým koeficientem tření. Po výpočtu mi bylo navrženo několik druhů výrobků, ze kterých vybírám kluzné ložisko s označením iglidur® R.

Výrobce uvádí tyto parametry ložiska: „Levný materiál s nízkými koeficienty tření a dobrou odolností proti opotřebení při nízkém až středním zatížení, je-li požadována vysoká odolnost proti opotřebení při nízkém zatížení.“³³

³³ Igus® : Doba životnosti [online]. 2010 [cit. 2010-04-26]. Iglicur®. Dostupné z WWW: <http://www.igus.cz/iPro/iPro_02_0027_0000_CZcs.htm?c=CZ&l=cs>.

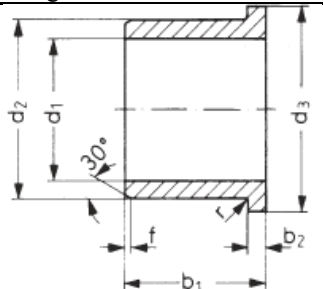
Použití:³⁴

- ⇒ je-li požadováno velmi levné ložisko
- ⇒ jsou-li požadovány velmi nízké koeficienty tření v suchém provozu
- ⇒ vyskytuje-li se zatížení na okraji
- ⇒ je-li požadována nízká absorpce vlhkosti
- ⇒ nemá-li obsahovat PTFE a silikon

Tab. 6.6-3 Vstupní parametry pro výpočet

typ provedení	F
průměr dříku d_1	10 mm
maximální síla zatížení F	51,33 N (60N)
typ pohybu	točivý
úhel pohybu	180 °
otáčky	7,5 min ⁻¹
materiál dříku	ocel
materiál pouzdra	hliník

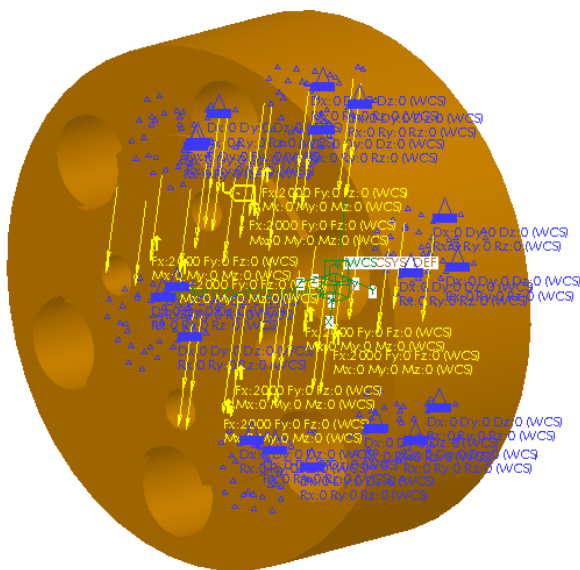
Tab. 6.6-4 Rozměry kluzného ložiska iglidur® R

$d_1 = 10 \text{ mm}$	průměr dříku	
$b_1 = 10 \text{ mm}$	šířka ložiska	
$b_2 = 1 \text{ mm}$	tloušťka příruby	
$d_2 = 12 \text{ mm}$	vnější průměr ložiska	
$d_3 = 18 \text{ mm}$	průměr příruby	
$f = 0,5$	zkosení	
$L_h = 21805 \text{ h}$	doba životnosti	

kluzné ložisko: **RFM-1012-10**

³⁴ Igus®. 2010 [30]

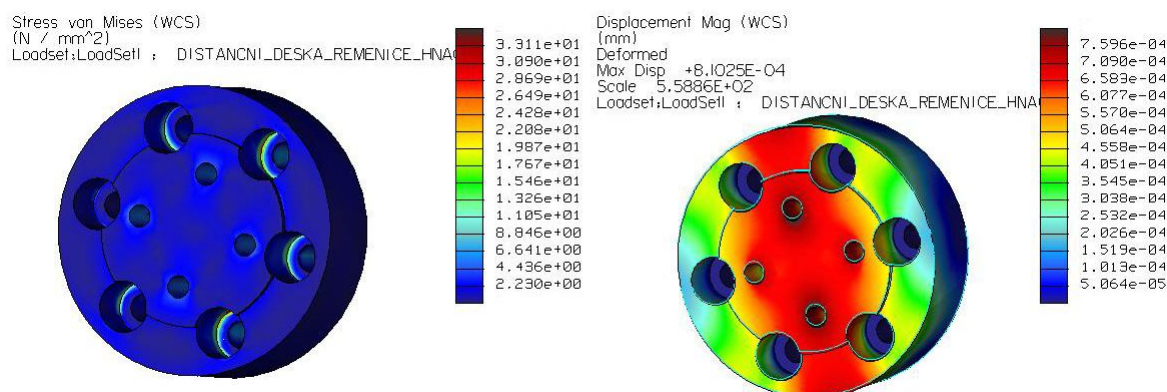
7.1.5 Distanční příruba pohonu



Obr. 6.6-5 Uložení a určení působení sil

Ozubenou řemenici připojují k pohonu pomocí čtyř šroubů M4 přes distanční přírubu, která vymezuje rovnoběžnost mezi řemenicemi. Otvary pro uchycení řemenice a připevnění příruby k harmonické převodovce pohonu jsou namáhány napínací silou řemene ($F_U = 2000\text{N}$) a momentem vyvozeným pohonem.

Největší napětí je v místech otvorů, kde je distanční příruba připevněná k pohonu. Hodnota napětí je 35,31 MPa. Maximální průhyb je $8,102 \cdot 10^{-4}\text{ mm}$.



Obr. 6.6-6 Výsledky výpočtu distanční desky řemenice hnací

7.2 Návrh napínacího šroubu

Napínací šroub je namáhán silou, která je doporučena jako maximální síla pro napínání ozubeného řemene F_U .

Tab. 7.2-1 Vstupní hodnoty výpočtu

$F_U = 2000\text{ N}$	max. napínací síla řemene
$\beta_k = 1,3$	součinitel přidavného krutu
$k_s = 1,2$	koeficient bezpečnosti šroubu
$R_e = 680\text{ MPa}$	pevnost třídy šroubu ISO 4762 – 6.8

Kontrolní podmínka

$$\beta_k \sigma_t \leq \sigma_{Dt} \quad (31)$$

Malý průměr závitu

$$d_3 = \sqrt{\frac{\beta_k \cdot 4 \cdot F_U \cdot k_s}{\pi \cdot R_e}} = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 4 \cdot 2000 \cdot 1,2}{\pi \cdot 680}} = 4,152 \text{ mm} \quad (32)$$

Tab. 7.2-2 Parametry napínacího šroubu

ŠROUB M5 ISO 4762-6.8	
d₂ = 4,48 mm	střední průměr závitu šroubu
d₃ = 4,019 mm	malý průměr závitu šroubu
P_h = 0,8 mm	stoupání závitu
β = 60°	vrcholový úhel metrického závitu
f_z = 0,2 mm	tření na závitu

Kontrola šroubu M5Napětí v tahu

$$\sigma_t = \frac{4F_U}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 2000}{\pi 4,019^2} = 157,654 \text{ MPa} \quad (33)$$

Úhel stoupání závitu

$$\gamma' = \arctan\left(\frac{P_h}{\pi d_2}\right) = \arctan\left(\frac{0,8}{\pi 4,48}\right) = 3,253^\circ \quad (34)$$

Úhel tření na závitu

$$\phi' = \arctan\left(\frac{f_z}{\cos \frac{\beta}{2}}\right) = \arctan\left(\frac{0,2}{\cos 30^\circ}\right) = 13,004^\circ \quad (35)$$

Smykové napětí namáhání v krutu

$$\tau = \frac{F_U \tan(\gamma' + \phi') \frac{d_2}{2}}{\left(\frac{\pi d_3^2}{16}\right)} = \frac{2000 \tan(3,253 + 13,004) \frac{4,48}{2}}{\left(\frac{\pi 4,019^2}{16}\right)} = 102,493 \text{ MPa} \quad (36)$$

Redukované napětí

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4\tau^2} = \sqrt{157,654^2 + 4 \cdot 102,493^2} = 258,6 \text{ MPa} \quad (37)$$

Výsledná bezpečnost

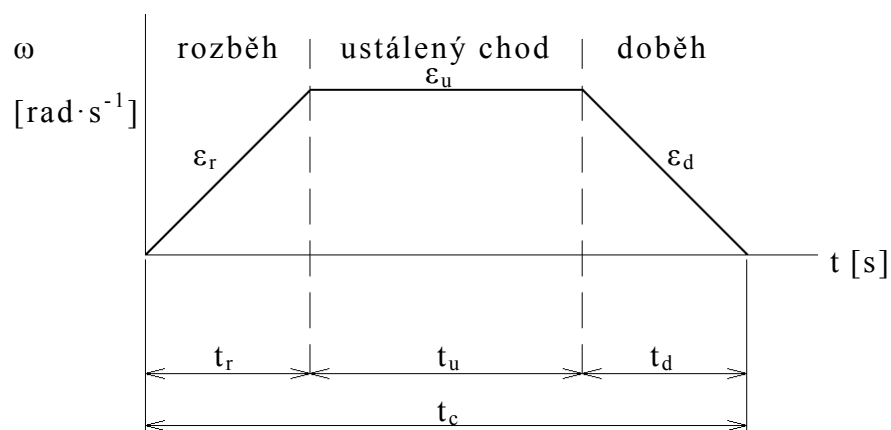
$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{680}{258,6} = 1,856 \text{ MPa (volí se v rozmezí 1,5 - 2,5)} \quad (38)$$

8 KONTROLA STÁVAJÍCÍ POHONNÉ JEDNOTKY

Navržený poslední článek manipulátoru MR Hercules se připojuje k harmonické převodovce od firmy Harmonic Drive LLC umístěné na nadstavbě manipulátoru. Je nutné zkontrolovat únosnost stávajících jednotek. Kontrola spočívá v rozložení sil v nejnepříznivější poloze.

8.1 Výpočet zrychlení ramene 3

Pro zjednodušení výpočtu doby zrychlení, ustáleného pohybu a brzdění se používá lichoběžníkový tvar pohybu, který je zřejmý z obr. 8.1-1.

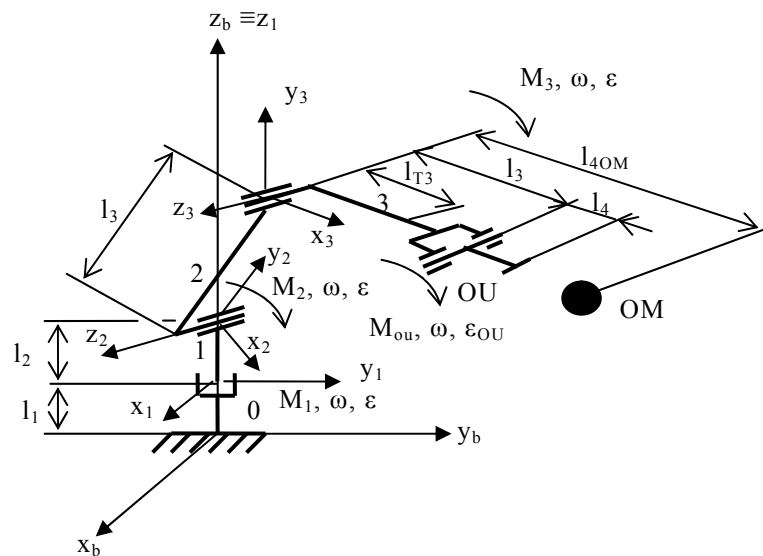


Obr. 8.1-1 Průběh úhlové rychlosti ω (lichoběžníkový tvar)

Pro ujasnění označení výpočtových parametrů zobrazuji kinematický model manipulátoru na obr. 8.1-3.



Obr. 8.1-2 Navržené rameno 3 připojené na nadstavbě manipulátoru



Obr. 8.1-3 Kinematický model manipulátoru

Současná pohybová jednotka disponuje úhlovou rychlostí $\omega = 0,524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Uvažuji dráhu potřebnou pro přemístění OM $\varphi = 90^\circ$. Úhlové zrychlení se stanovuje podle vztahu:

$$\varepsilon_r = \frac{\omega^2}{2 \cdot k_l \cdot \varphi} = \frac{0,524^2}{2 \cdot 0,1 \cdot \frac{\pi}{2}} = 0,873 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (39)$$

kde k_l je koeficient velikosti dráhy rozběhu (uvažuji 10% z celkové dráhy).

Dráha rozběhu je

$$\varphi_r = \varphi \cdot k_l = \frac{\pi}{2} \cdot 0,1 = 0,157 \text{ rad} = 9^\circ \quad (40)$$

a podle lichoběžníkového tvaru průběhu rychlosti je dráha rozběhu rovna dráze doběhu $\varphi_r = \varphi_d$.

Čas potřebný pro zrychlení ramene z klidové pozice na hodnotu ustálené rychlosti

$$t_r = \frac{\omega}{\varepsilon_r} = \frac{0,524}{0,873} = 0,6 \text{ s.} \quad (41)$$

Čas potřebný pro dojezd je roven času rozjezdu $t_d = t_r = 0,6 \text{ s.}$ (42)

Celkový čas pro přemístění OM na uvažované dráze je

$$t_c = \frac{\omega}{\varepsilon_r} + \frac{\varphi}{\omega} = \frac{0,524}{0,873} + \frac{1,571}{0,524} = 3,6 \text{ s} \quad (43)$$

Zrychlení středu OM a_{IOM} a zrychlení těžiště navržené pohybové jednotky a_{T3}

$$a_{IOM} = \varepsilon_r \cdot l_{OM} = 0,873 \cdot 0,824 = 0,719 \text{ ms}^{-2} \quad (44)$$

$$a_{T3} = \varepsilon_r \cdot l_{T3} = 0,873 \cdot 0,461 = 0,402 \text{ ms}^{-2} \quad (45)$$

8.2 Kontrola třetí pohonné jednotky ramene 3

Třetí pohonná jednotka natáčí posledním ramenem kolem horizontální osy. Jedná se o rotaci R_3 dle obr.1.1-1. Na obr. 8.2-1 jsou zobrazeny fyzikální vlastnosti navrženého ramene 3 s OM. Na následujícím obrázku zobrazují souřadný systém ramene.

```
VOLUME = 2.2811322e+06 MM^3
SURFACE AREA = 8.7310351e+05 MM^2
AVERAGE DENSITY = 3.9784443e-09 TONNE / MM^3
MASS = 9.0753575e-03 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to LCS3 coordinate frame:
X Y Z 4.6098703e+02 7.8867374e+00 -6.4587843e-01 MM

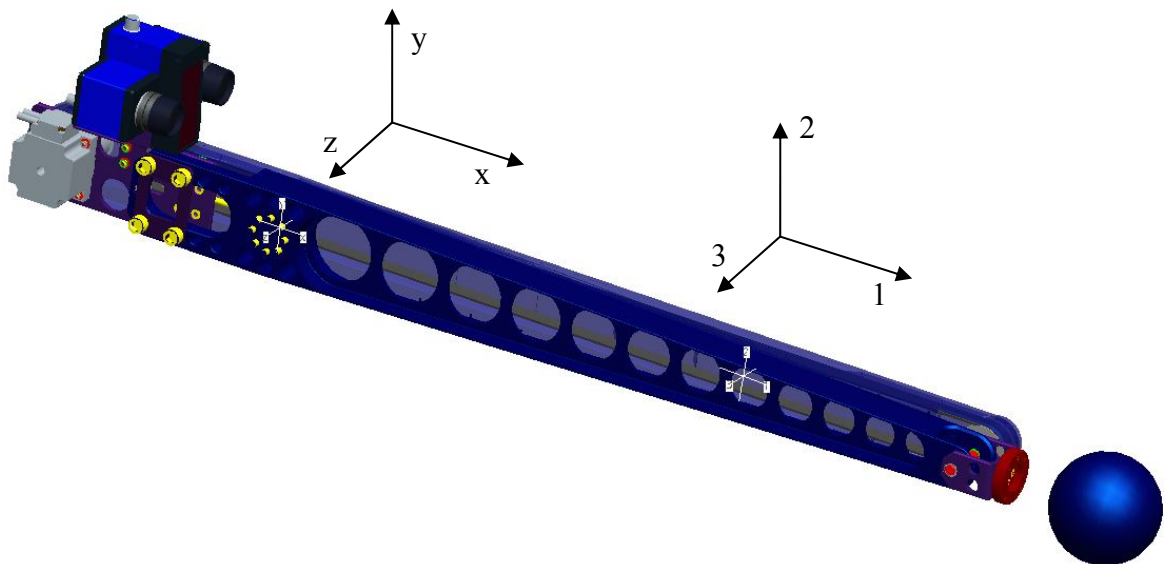
INERTIA with respect to LCS3 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.5871705e+01 1.0150159e+01 9.2028082e+00
Iyx Iyy Iyz 1.0150159e+01 3.7367560e+03 -5.1900107e-02
Izx Izy Izz 9.2028082e+00 -5.1900107e-02 3.7414345e+03

INERTIA at CENTER OF GRAVITY with respect to LCS3 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.5303426e+01 4.3145287e+01 6.5006969e+00
Iyx Iyy Iyz 4.3145287e+01 1.8081567e+03 -9.8128830e-02
Izx Izy Izz 6.5006969e+00 -9.8128830e-02 1.8122745e+03
```

Obr. 8.2-1 Parametry navrženého ramene s OM



Obr. 8.2-2 Souřadný systém ramene 3

Tab. 8.2-1 Označení parametrů ramene 3

$m_3 = 9,075 \text{ kg}$	hmotnost ramene 3
$I_{C3} = 3,741 \text{ kgm}^2$	celkový moment setrvačnosti ramene 3

Moment nevyvážených hmot

$$M_{N3} = m_3 \cdot g \cdot l_{T3} = 9,075 \cdot 9,81 \cdot 460,987 = 41,027 \text{ Nm} \quad (46)$$

Dynamický moment

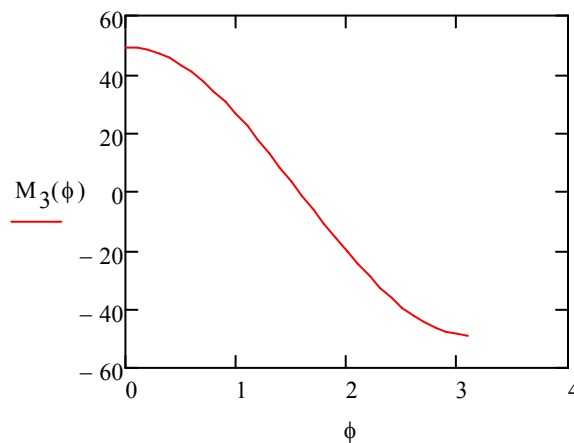
$$M_{D3} = \varepsilon_r \cdot I_{C3} = 0,873 \cdot 3,741 = 3,265 \text{ Nm} \quad (47)$$

Celkový moment působící na stávající pohonnou jednotku

$$M'_3 = M_{N3} + M_{D3} = 41,027 + 3,265 = 44,292 \text{ Nm} \quad (48)$$

$$\underline{\underline{M_3 = M'_3 \cdot k = 44,292 \cdot 1,2 = \underline{\underline{53,151 \text{ Nm}}}}} \quad (49)$$

kde k je koeficient bezpečnosti.

Průběh momentu na dráze ϕ při přemístění OM v rozsahu úhlu 180° Obr. 8.2-3 Průběh momentu M_3 při pohybu ramene 3**8.2.1 Výpočet ramene 3 bez objektu manipulace**

```

VOLUME = 1.7575334e+06 MM^3
SURFACE AREA = 8.4168758e+05 MM^2
AVERAGE DENSITY = 2.3187937e-09 TONNE / MM^3
MASS = 4.0753575e-03 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to LCS3 coordinate frame:
X Y Z 1.5611403e+01 1.7562867e+01 -1.4382978e+00 MM

INERTIA with respect to LCS3 coordinate frame: [TONNE * MM^2]

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.0871705e+01 1.0150159e+01 9.2028082e+00
Iyx Iyy Iyz 1.0150159e+01 3.3687598e+02 -5.1902713e-02
Izx Izy Izz 9.2028082e+00 -5.1902713e-02 3.4155451e+02

```

Obr. 8.2-4 Parametry ramene 3 bez OM

Tab. 8.2-2 Hodnoty ramene 3 bez OM

$m'_3 = 4,075 \text{ kg}$	hmotnost ramene 3
$l'_{T3} = 15,611 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště od osy rotace
$I'_{C3} = 0,34155 \text{ kgm}^2$	moment setrvačnosti ramene 3

Moment nevyvážených hmot

$$M'_{N3} = m'_3 \cdot g \cdot l'_{T3} = 4,075 \cdot 9,81 \cdot 15,611 = 0,624 \text{ Nm} \quad (50)$$

Dynamický moment

$$M'_{D3} = \varepsilon_r \cdot I'_{C3} = 0,873 \cdot 0,34155 = 0,298 \text{ Nm} \quad (51)$$

Celkový moment působící na stávající pohonnou jednotku bez OM

$$M''_3 = M'_{N3} + M'_{D3} = 0,624 + 0,298 = 0,922 \text{ Nm} \quad (52)$$

$$M'_3 = M'_3 \cdot k = 0,922 \cdot 1,2 = 1,106 \text{ Nm} \quad (53)$$

kde k je koeficient bezpečnosti

Celkový moment, který působí na pohonnou jednotku při akceleraci ramene z nejnepříznivější polohy je $M_3 = 53,151 \text{ Nm}$. Harmonická převodovka má stanovenou limitní hodnotu pro krátkodobé zatížení točivého momentu 120 Nm (limit pro opakovaný točivý moment). Tím mohu konstatovat, že únosnost stávající pohonné jednotky R_3 je vyhovující.

8.3 Kontrola druhé pohonné jednotky ramene 2

Jde o kontrolu druhé pohonné jednotky (rotace R_2) s připojeným navrženým ramenem 3 a se současným ramenem 2 manipulátoru MR Hercules. Parametry ramene 2 jsou získány z již navrženého modelu manipulátoru. Pro rychlost, zrychlení a dráhu rozběhu uvažuji stejné hodnoty jako při kontrole rotace R_3 .



Obr. 8.3-1 Spojení ramene 2 a ramene 3

```
VOLUME = 3.6816859e+06 MM^3
SURFACE AREA = 1.5565767e+06 MM^2
AVERAGE DENSITY = 4.2263763e-09 TONNE / MM^3
MASS = 1.5560190e-02 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to LCS2 coordinate frame:
X Y Z 4.5998704e+00 6.7367584e+02 7.3527677e+01 MM

INERTIA with respect to LCS2 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.0403102e+04 -2.2058533e+01 -7.8929160e+00
Iyx Iyy Iyz -2.2058533e+01 1.4527613e+02 -9.8191267e+02
Izx Izy Izz -7.8929160e+00 -9.8191267e+02 1.0288429e+04

INERTIA at CENTER OF GRAVITY with respect to LCS2 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 3.2571551e+03 2.6159719e+01 -2.6301830e+00
Iyx Iyy Iyz 2.6159719e+01 6.0823542e+01 -2.1115702e+02
Izx Izy Izz -2.6301830e+00 -2.1115702e+02 3.2262763e+03
```

Obr. 8.3-2 Parametry celkové sestavy ramene 2 a připojeného ramene 3

Tab. 8.3-1 Vstupní údaje pro výpočet druhé pohonné jednotky

$m_2 = 15,560190 \text{ kg}$	celková hmotnost obou ramen
$r_{T2} = 673,67584 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště v ose y
$I_{C3} = 10,288429 \text{ kgm}^2$	moment setrvačnosti obou ramen

Moment nevyvážených hmot působící na druhou pohonnou jednotku

$$M_{N2} = m_2 \cdot r_{T2} \cdot g = 15,56 \cdot 673,676 \cdot 9,81 = 102,798 \text{ Nm} \quad (54)$$

Dynamický moment při rozjezdu a brzdění

$$M_{D2} = \varepsilon_r \cdot I_{C2} = 10288 \cdot 0,873 = 8,978 \text{ Nm} \quad (55)$$

Celkový moment působící na druhou pohonnou jednotku

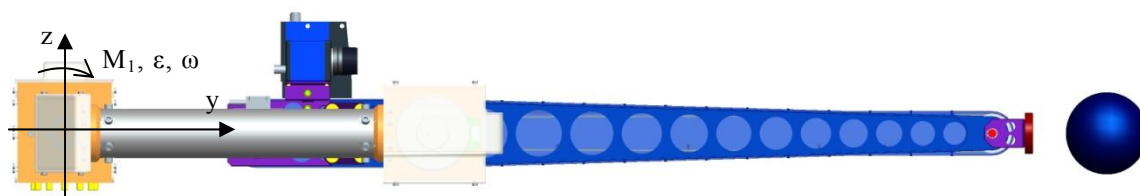
$$\underline{\underline{M_2 = M_{N2} + M_{D2} = 102,798 + 8,978 = 111,777 \text{ Nm}}} \quad (56)$$

Celkový moment pomocí kterého působí rameno 2 s připojeným navrženým ramenem 3 na pohybovou jednotku je 111,8 Nm. Únosnost harmonické převodovky pro tento způsob zatížení je 120 Nm, což je limit pro opakovaný točivý moment. Tímto konstatuji, že harmonická převodovka pohonné jednotky bude dosti namáhaná, ale celkový krouticí moment nepřesáhne limitní hodnotu stávající převodovky a únosnost tedy bude splněna. Při takto velkém namáhání bude životnost harmonické převodovky snížena.

Doporučuji, aby při pohybu se zátěží OM okolo 5 kg programátor (obsluha) MR bral na zřetel velkou opatrnost a použil nižší rychlost při přemísťování OM!

8.4 Kontrola první pohonné jednotky

První pohonná jednotka otáčí manipulátorem MR Herkules kolem vertikální osy R_1 (viz obr. 1.1-1). Pohon překonává dynamické zatížení při rozběhu a brzdění. Při ustáleném chodu překonává pohon jen tření v ložiscích.



Obr. 8.4-1 Výchozí pozice manipulátoru pro výpočet pohonné jednotky

```

VOLUME = 4.6772617e+06 MM^3
SURFACE AREA = 2.0266571e+06 MM^2
AVERAGE DENSITY = 4.3861204e-09 TONNE / MM^3
MASS = 2.0515033e-02 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to LCS1 coordinate frame:
X Y Z 2.8797796e+01 5.1096794e+02 6.2267990e+01 MM

INERTIA with respect to LCS1 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.0378481e+04 -1.8164751e+02 -3.5773221e+01
Iyx Iyy Iyz -1.8164751e+02 1.7496138e+02 -6.5100998e+02
Izx Izy Izz -3.5773221e+01 -6.5100998e+02 1.0354090e+04

```

Obr. 8.4-2 Celkové parametry manipulátoru působící na první pohybovou jednotku

Tab. 8.4-1 Vstupní výpočty pro kontrolu první pohonné jednotky

$I_{C1} = 10,354 \text{ kgm}^2$	moment setrvačnosti manipulátoru vztažený k první pohonné jednotce
$m_1 = 20,515 \text{ kg}$	hmotnost ramene 2, ramene 3 a druhé pohonné jednotky
$r_{T1} = 673,67584 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště ramene 2, ramene 3 a druhé pohonné jednotky
$l_{1OM} = 1274 \text{ mm}$	vzdálenost osy rotace první pohonné jednotky ke středu OM

Dynamický moment působící na první pohonnou jednotku

$$M_{D1} = \underline{\underline{M_1}} = \varepsilon_r \cdot I_{C1} = 0,873 \cdot 10,354 = \underline{\underline{9,036 \text{ Nm}}} \quad (57)$$

Únosnost harmonické převodovky i motoru je dostačující.

V tabulce tab. 8.4-2 vypisují zatížení momentem druhé pohonné jednotky pro různé hmotnosti OM. Z výpočtů vyplývá, že tato pohonná jednotka je nejvíce zatěžována, a tudíž uvádím zatížení jen pro tuto pohonnou jednotku. Rychlost a zrychlení ponechávám beze změny.

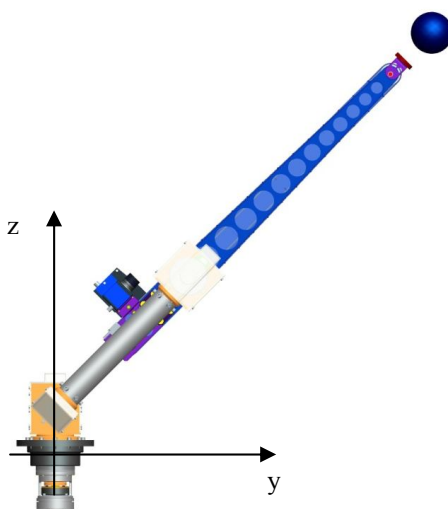
Tab. 8.4-2 Zatížení druhé pohonné jednotky pro různé hmotnosti OM

hmotnost OM	M_N	M_D	M_C	ω
5 kg	102,798 Nm	8,978 Nm	111,777 Nm	0,524 rad·s ⁻¹
3 kg	77,811 Nm	6,144 Nm	83,954 Nm	0,524 rad·s ⁻¹
1 kg	52,824 Nm	3,309 Nm	56,133 Nm	0,524 rad·s ⁻¹

Doporučuji, aby byla nosnost manipulátoru snížena na tři kilogramy, a to z důvodu životnosti harmonické převodovky druhé pohonné jednotky. Bude-li požadována manipulace s OM dosahující hmotnosti pěti kilogramů, je potřeba, aby obsluha byla velmi opatrná a snažila se vyhýbat manipulaci kolem nepříznivé polohy manipulátoru, která je při největším vyložení ramen. Dále je nutné brát ohleduplnost na rychlost a zrychlení pohybu při polohování OM.

8.5 Kontrola ložiska první pohonné jednotky

U první pohonné jednotky je použito ložisko RB 8016 se zkříženými válečky. Ložisko zachycuje axiální, radiální a momentové zatížení působící od manipulátoru. Největší axiální zatížení bude na ložisko působit ve svislé poloze manipulátoru. Největší zatížení radiální silou bude působit při naklonění ramen manipulátoru o úhel 45° . Největší momentové zatížení je pak při horizontální poloze manipulátoru, kde se projevují i dynamické síly při rozjezdu nebo brzdění. Ložisko kontroluji při největším zatížení, kdy na něj působí nejvyšší možné zatížení momentem, axiální i radiální silou. Toto zatížení nastává, když je manipulátor v poloze pod úhlem 45° při nataženém ramenu, jak je zobrazeno na obr. 8.5-1



Obr. 8.5-1 Poloha manipulátoru při největším zatížení ložiska


```

VOLUME = 4.6772617e+06 MM^3
SURFACE AREA = 2.0266571e+06 MM^2
AVERAGE DENSITY = 4.3861204e-09 TONNE / MM^3
MASS = 2.0515033e-02 TONNE

CENTER OF GRAVITY with respect to LCS1 coordinate frame:
X Y Z 2.8797796e+01 3.5884187e+02 4.2255501e+02 MM

INERTIA with respect to LCS1 coordinate frame: (TONNE * MM^2)

INERTIA TENSOR:
Ixx Ixy Ixz 1.1265437e+04 -1.2840749e+02 -1.6420221e+02
Iyx Iyy Iyz -1.2840749e+02 6.2128887e+03 -5.5706119e+03
Izx Izy Izz -1.6420221e+02 -5.5706119e+03 5.2031190e+03

```

Obr. 8.5-2 Parametry manipulátoru bez první pohonné jednotky

Tab. 8.5-1 Hodnoty manipulátoru bez první pohonné jednotky

$I_L = 10,354 \text{ kgm}^2$	moment setrvačnosti manipulátoru vztažený k axiální ose ložiska
$m_1 = 20,515 \text{ kg}$	hmotnost manipulátoru
$r_{T1} = 673,67584 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště manipulátoru
$\alpha = 45^\circ$	úhel naklopení manipulátoru
$l_{1OM} = 1274 \text{ mm}$	vzdálenost od první pohonné jednotky ke středu OM
$l_y = 358,841 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště v ose y
$l_z = 422,555 \text{ mm}$	vzdálenost těžiště v ose z

Síly působící na ložisko pro nejnepříznivější polohu pro každou sílu

Odstředivá síla

zrychlení středu objektu manipulace

$$a_r = \varepsilon_r \cdot l_{1OM} = 0,873 \cdot 1274,00 = 1,112 \text{ ms}^{-2} \quad (58)$$

$$F_{od} = m_1 \cdot a_r = 20,515 \cdot 1,112 = 22,808 \text{ N} \quad (59)$$

Maximální radiální síla

$$F_{rm} = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = 20,515 \cdot 9,81 \cdot \cos 45 = 142,258 \text{ N} \quad (60)$$

Maximální axiální síla

$$F_{am} = m_1 \cdot g = 20,515 \cdot 9,81 = 201,184 \text{ N} \quad (61)$$

Moment nevyvážených hmot

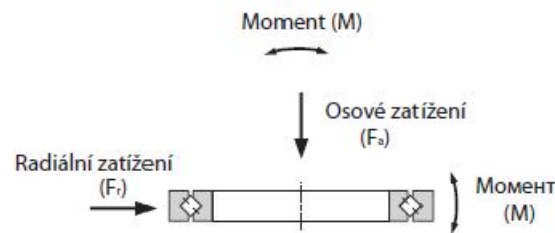
$$M_{N1m} = m_1 \cdot g \cdot l_{1OM} = 20,515 \cdot 9,81 \cdot 1274,0 = 256,308 \text{ Nm} \quad (62)$$

Maximální klopný moment působící na ložisko

$$M_{Clm} = M_{N1m} + M_{D1} = 256,308 \cdot 9,036 = 265,3 \text{ Nm} \quad (63)$$

8.5.1 Životnost ložiska

Dle katalogu THK jsem spočetl životnost ložiska podle jejich postupu výpočtu³⁵.



Obr. 8.5-3 Možné způsoby zatížení ložiska RB

Síly působící na ložisko při naklopení ramene o úhel 45° dle obr. 8.5-1Radiální síla

$$F_r = F_{rm} = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha = 20,515 \cdot 9,81 \cdot \cos 45 = 142,258 \text{ N} \quad (64)$$

Axiální síla

$$F_a = m_1 \cdot g \cdot \cos \alpha = 20,515 \cdot 9,81 \cdot \sin 45 = 142,258 \text{ N} \quad (65)$$

Klopný moment

$$M_L = F_a \cdot l_y \cdot \cos \alpha + F_r \cdot l_z \cdot \sin \alpha$$

$$M_L = 142,258 \cdot 358,842 \cdot \cos 45 + 142,258 \cdot 422,555 \cdot \sin 45 = 78,602 \text{ Nm} \quad (66)$$

Dynamický radiální koeficient a dynamický axiální koeficient $k_{X,Y}$

Tab. 8.5-2 Dynamický radiální a axiální koeficient

Klasifikace	X	Y
$\frac{F_a}{F_r + 2M/dp} \leq 1,5$	1	0,45
$\frac{F_a}{F_r + 2M/dp} > 1,5$	0,67	0,67

³⁵ THK CO., LTD. THK [online]. 2007 [cit. 2010-04-29]. Křížová válečková ložiska. Dostupné z WWW: <www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942>.

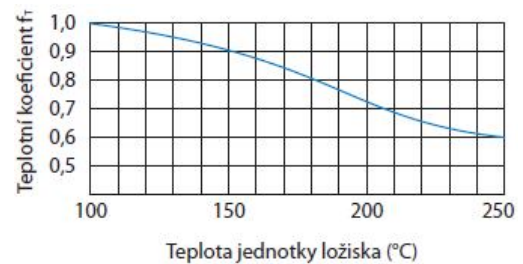
$$k_{x,y} = \frac{F_a}{F_r + \frac{2M_L}{d_p}} = \frac{142,258}{142,258 + \frac{2 \cdot 78,602}{0,098}} = 0,081 \leq 1,5 \quad (67)$$

Dynamické ekvivalentní radiální zatížení P_C

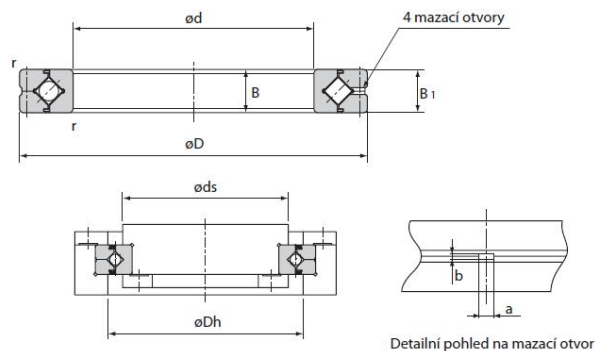
$$P_C = X \cdot \left(F_r + \frac{2 \cdot M_L}{d_p} \right) + Y F_a = 1 \left(142,258 + \frac{2 \cdot 78,602}{0,098} \right) + 0,45 \cdot 142,258 = 1810 \text{ N} \quad (68)$$

Provozní podmínky	f_w
Klidný chod bez dynamických rázů	1 až 1,2
Normální pohyb	1,2 až 1,5
Pohyb se silnými rázy	1,5 až 3

Obr. 8.5-4 Hodnota zátěžového koeficientu f_w



Obr. 8.5-5 Teplotní koeficient f_T



Obr. 8.5-6 Rozměry ložiska RB 8016

Průměr hřídele	Č. modelu	Hlavní rozměry							Rozměry dosedací plochy		Základní jmenovitá zatížení (radiální)		Hmotnost
		Vnitřní průměr	Vnější průměr	Průměr roztečné kružnice válečků	Šířka	Mazací otvor		r _{min}	ds	Dh	C	C ₀	
						a	b						
80	RB 8016	80	120	98	16	3	1,6	0,6	91	111	30,1	42,1	0,7

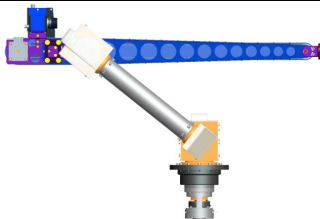

Obr. 8.5-7 Parametry ložiska RB 8016 [mm]

$$L = \left(\frac{f_T \cdot C}{f_w \cdot P_C} \right)^{\frac{10}{3}} \cdot 10^6 = \left(\frac{1 \cdot 30100}{1,5 \cdot 1810} \right)^{\frac{10}{3}} \cdot 10^6 = 3,036 \cdot 10^9 \text{ ot} \quad (69)$$

L je minimální počet otáček ložiska (životnost), které může ložisko dosáhnout, aniž by došlo k opotřebení ložiska.

V závěru této kapitoly uvádím srovnání parametrů navrženého ramene 3 umístěného na nadstavbě s již řešeným manipulátorem MR Hercules. Pro přehlednost uvádím parametry v následující tabulce.

Tab. 8.5-3 Srovnání parametrů navrženého manipulátoru se stávajícím manipulátorem

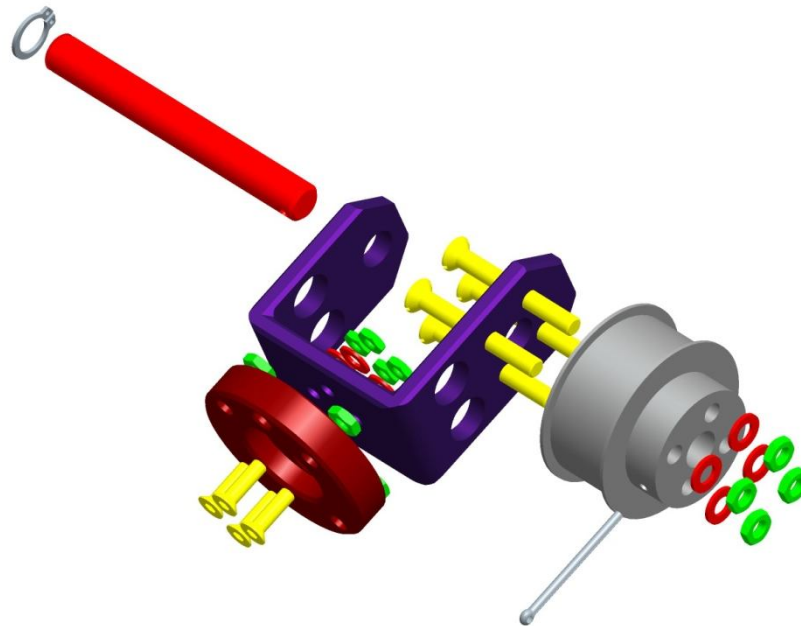
PARAMETRY MR HERCULES	NAVRŽENÝ MANIPULÁTOR	STÁVAJÍCÍ MANIPULÁTOR
		
nosnost	3 (5) kg	1,1 kg
počet stupňů volnosti	4	3
hmotnost	24 kg	22 kg
rychlost pohybu	$0,524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,524 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$
délka článků ramen	450 mm, 734 mm (dosah 1184)	450 mm, 734 mm (dosah 1184 mm)

9 Montáž navrženého ramene MR Hercules

V této kapitole se zaměřuji na ujasnění postupu montáže navrženého posledního článku MR Hercules.

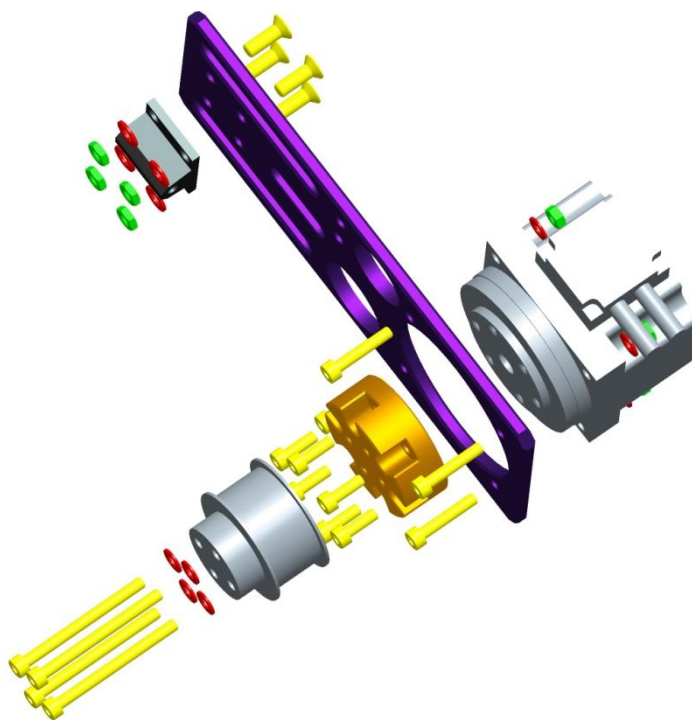
9.1 Postup montáže

1. **smontování OÚ efektoru** (obr. 9.1-1) – matice se pro připojení efektoru MR Hercules nasunou do interface, který je spojený pomocí čtyř šroubů k pohyblivé části OÚ efektoru. Dále se do pohyblivé části OÚ efektoru nasune hřídel a ustaví se hnaná řemenice. Pomocí šroubového spoje se řemenice připevní k pohyblivé části OÚ.



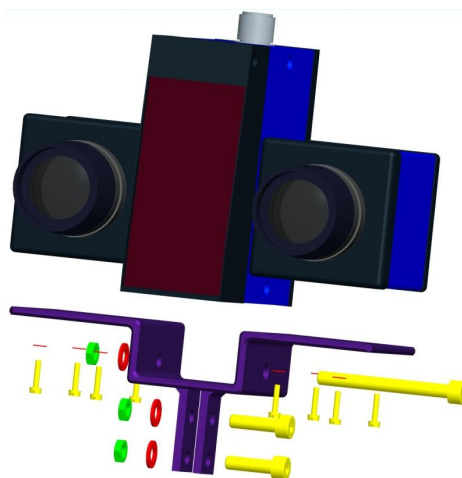
Obr. 9.1-1 Montáž OÚ efektoru

2. **smontování pohonné jednotky** (obr. 9.1-2) – na pohon se připevní pomocí šesti šroubů velikosti M4 distanční příruba, která má za úkol nastavit rovnoběžnou vzdálenost mezi řemenicemi. Řemenice se pomocí čtyř šroubů uchytí k distanční přírubě, ve které je vytvořený závit. Pohon s řemenicí se připojí k posuvné desce, na kterou se připevní matice napínacího šroubu řemene.



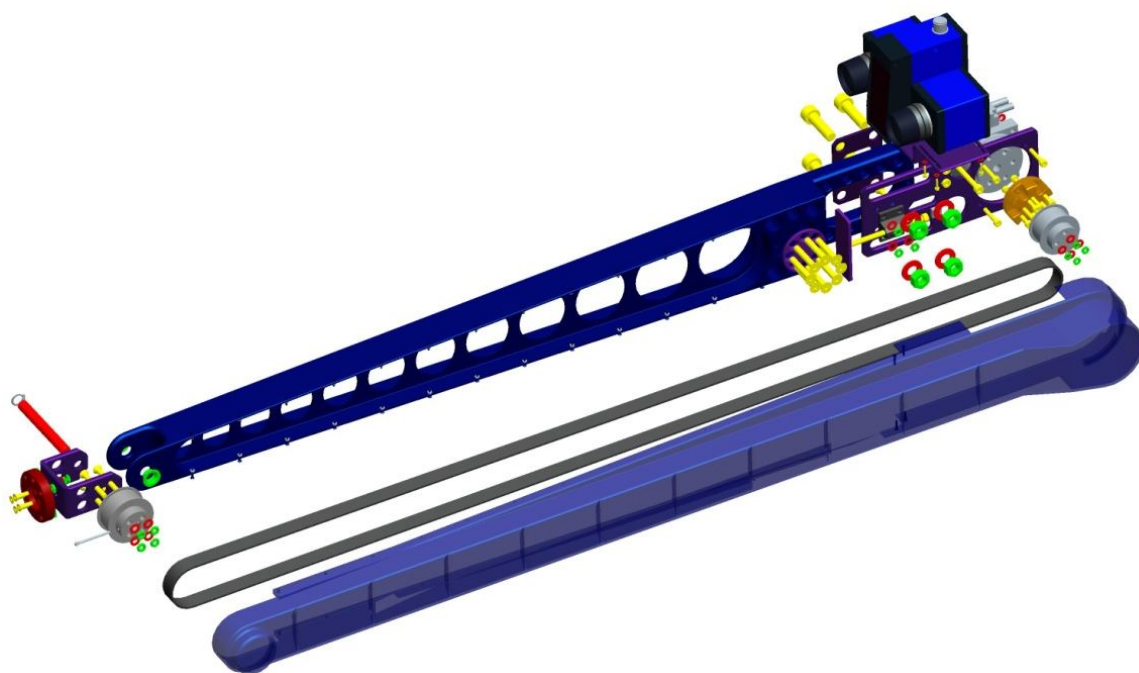
Obr. 9.1-2 Montáž pohonné jednotky

3. **smontování neseného zařízení** (obr. 9.1-3) – nejprve se na tvarovaný profil připevní laserový snímač vzdálenosti, který má ve spodní části průchozí otvor pro jeho připevnění. Poté se na bočnice profilu připevní kamery, jež mají ve spodní části čtyři otvory se závitem M2, do kterých se našroubují šrouby, a tím se kamery připevní k profilu, v němž je vytvořena drážka pro nastavování kamer.



Obr. 9.1-3 Montáž neseného zařízení

4. **smontování ramene 3** (obr. 9.1-4) – nejprve se zaměřuji na připevnění OÚ efektoru k rameni. Do otvorů na rameni se nasunou kluzná ložiska. Jedná se o uložení s přesahem. Vnitřní stranu ložisek je vhodné namazat některým z dostupných tuhých maziv, která se používají pro mazání kluzných ložisek. Připojí se pohyblivá část OÚ a vloží se hřídel, která se zafixuje z jedné strany hřídelovým pojistným kroužkem, a ze strany druhé se připevní pomocí závlačky k hnané řemenici. Hřídel se tedy otáčí v ložiscích spolu s pohyblivou částí OÚ efektoru. V dalším kroku se pomocí čtyř šroubů připevní pohon k ramenu 3. Mezi nosné rameno a šrouby je vložena ocelová deska z důvodu nedeformování se materiálu ramene. Pro ustavení hnací řemenice do roviny s hnanou řemenicí se připevní vodící tělísko. Nasadí se ozubený řemen a pomocí napínacího šroubu se docílí napnutí, které nesmí přesáhnout dovolenou maximální napínací sílu F_U ozubeného řemene. Mezi napínacím šroubem a ramenem robotu je vložena ocelová deska, která brání deformaci nosného ramene. Šrouby pro připevnění vodící desky se dotáhnou a pohon je pevně spojený s nosným ramenem robotu. Takto připravené rameno 3 se připevní ke stávající pohonné jednotce manipulátoru mobilního robotu Hercules pomocí dvanácti šroubů velikosti M6. Mezi šrouby a nosným ramenem je taktéž vložena ocelová deska kvůli deformaci ramene v místě upevnění. Posledním krokem montáže je opatření ozubeného řemene krytem. Kryt je přišroubován k nosnému rameni, ve kterém jsou vytvořeny otvory a z vnitřní strany se vloží matice. V krajních otvorech je v nosném ramenu vytvořen závit, a to kvůli dostatečnému množství materiálu.



Obr. 9.1-4 Montáž ramene 3

ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Diplomová práce je zaměřena na návrh posledního článku manipulátoru MR Hercules. Cílem práce bylo rozšířit manipulační nadstavbu MR Hercules o další stupeň volnosti v podobě orientačního ústrojí efektoru. V úvodu práce byla provedena rešerše na téma orientační ústrojí robotu. Poté byly zkonstruovány varianty řešení a dle metodiky konstruování a vlastního uvážení byla vybrána optimální varianta pro daný typ úlohy.

Tato varianta byla konstrukčně zpřesněna pomocí prostředků pro podporu konstruování. Pro další stupeň volnosti byl navržen pohon, který byl umístěn na druhý konec ramene, aby svou hmotností přispíval k jeho vyvážení a snížil tak celkovou setrvačnost posledního článku manipulátoru. Krouticí moment vyvozený pohonem byl přenesen na osově vzdálené řemenice ozubeným řemenem.

V dalším kroku byla provedena kontrola hlavních konstrukčních uzlů, jež jsou nějakým způsobem zatěžovány. Dalším bodem zadání diplomové práce bylo provést kontrolu stávající pohonné jednotky. Manipulátor disponuje třemi stupni volnosti, ve kterých jsou použity totožné typy pohonů. Kontrolou bylo zjištěno, že stávající pohonné jednotky jsou vhodné pro navrženou úpravu posledního článku manipulátoru. Výjimkou je druhá pohonná jednotka, která se pohybuje na hranici bezpečného provozu v nejnepríznivější poloze. Největší zatížení harmonické převodovky, na které jsou ramena manipulátoru připojena, nebyla překročena.

Doporučuji, aby nosnost robotu byla snížena na tři kilogramy, a to z důvodu životnosti harmonické převodovky. V případě, že bude požadováno přemístění objektu manipulace s hmotností dosahující pěti kilogramů, je potřeba, aby obsluha brala velký zřetel na polohování v oblasti nejnepríznivější polohy a snažila se spíše této poloze vyhýbat. Dále doporučuji snížit rychlosti pohonných jednotek a jejich opatrnější rozjíždění či brzdění.

Poslední část diplomové práce byla věnována doporučenému postupu při montáži posledního článku manipulátoru MR Hercules, včetně připojení na stávající pohybovou jednotku manipulátoru.

LITERATURA

- [1] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory : učební text. 1. vyd. VŠB-technická univerzita ostrava : Ediční středisko VŠB – TUO, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [2] LEINVEBER, Jan. – VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Druhé doplněné vydání. Praha: ALBRA – pedagogické nakladatelství, 2005. 907 s. ISBN 80-7361-011-6.
- [3] KLETEČKA, Jaroslav. – FOŘT, Petr. *Technické kreslení*. Druhé opravené vydání. Brno: Computer Press, 2007. 252 s. ISBN 978-80-251-1887-0.
- [4] HORYL, Petr. *Statika a Dynamika*. dotisk 3. vydání. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 225 s. ISBN 80-248-0509-X.
- [5] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře : Části pohonů strojů*. 1. vydání. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 128 s. ISBN 978-80-248-1860-3.
- [6] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře : části spojovací [záznam a]*. 1. vydání. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. 90 s. ISBN 978-80-248-1290-8.
- [7] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty : pohony, senzory, řízení*. První vydání. Praha : BEN, 2005. 248 s. Robotika. ISBN 80-7300-141-1.
- [8] KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2004. 139 s. ISBN 80-248-0626-6
- [9] MOSTÝN, Vladimír. *Mechatronika*. 1. vydání. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2000. 68 s. ISBN 80-7078-734-1.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [10] www.tyma.cz
- [11] www.thk.com
- [12] www.abb.cz
- [13] www.army-technology.com
- [14] www.americancrane.com
- [15] www.quido.cz
- [16] gizmodo.com
- [17] www.is.northropgrumman.com
- [18] www.kuka-robotics.com
- [19] www.harmonicdrive.net
- [20] www.maxonmotor.ch
- [21] www.hennlich.cz
- [22] www.igus.cz
- [23] www.teatechnik.cz
- [24] www.skf.cz

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1-1 <http://robot.vsb.cz/galerie/roboty/hercules/>
- Obr. 1.5-1 <http://robot.vsb.cz/galerie/roboty/hercules/>
- Obr. 1.5-2 <http://robot.vsb.cz/galerie/roboty/hercules/>
- Obr. 2.1-1 www.abb.cz/product/seitp327/c7b5bce646d41f74c12574030033e34f.aspx
- Obr. 2.1-2 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.1-3 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.2-1 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.2-2 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.2-3 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.3-1 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 2.3-2 www.abb.cz/product/seitp327/c748ca53ad0641c5c125726f0047340a.aspx
- Obr. 2.4-1 www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap1.html
- Obr. 2.4-2 www.americancrane.com/Telerob/HMV.htm
- Obr. 2.4-3 www.quido.cz/260/tyden.htm
- Obr. 2.4-4 gizmodo.com/312093/new-irobot-warrior-x700-carries-big-payloads-and-big-guns
- Obr. 2.4-5 www.is.northropgrumman.com/by_solution/remote_platforms/product/index.html
- Obr. 2.4-6 www.americancrane.com/Telerob/teleMAX.htm
- Obr. 2.4-7 www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap4.html
- Obr. 2.4-8 www.army-technology.com/contractors/mines/piap/piap4.html
- Obr. 2.4-9 www.abb.cz/product/seitp327/8d5577558225e087c125726f0047617c.aspx
- Obr. 2.4-10 www.abb.cz/product/seitp327/b90966baf74baa4fc1256f2c00302c32.aspx
- Obr. 2.4-11 www.abb.cz/product/seitp327/c748ca53ad0641c5c125726f0047340a.aspx
- Obr. 2.4-12 www.abb.cz/product/seitp327/9727dbd18e84d3e7c1257061002b3c1b.aspx
- Obr. 2.4-13 www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/special/arc_welding_robots/kr5_arc_hw

- Obr. 2.4-14 www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/special/arc_welding_robots/kr5_arc/start.htm
- Obr. 2.4-15 www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/special/atex_compliant_robots/kr30_l16_2_ex
- Obr. 2.4-16 www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/low/kr15_sl
- Obr. 3.1-1 www.harmonicdrive.net/products/gearheads/csg-unit/
- Obr. 3.3-1 http://www.maxonmotor.ch/ch/en/product_overview.html
- Obr. 3.3-2 http://www.maxonmotor.ch/ch/en/product_overview.html
- Obr. 3.3-3 www.harmonicdrive.net/products/gearheads/csg-unit/
- Obr. 6.2-1 [1] SKAŘUPA, J. 2007
- Obr. 8.5-3 www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942
- Obr. 8.5-4 www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942
- Obr. 8.5-5 www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942
- Obr. 8.5-6 www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942
- Obr. 8.5-7 www.hennlich.cz/obrazky.php?id=8942